

工學碩士 學位論文

농도계측기법과 *PIV* 및 *CFD*에 의한 산업용
교반기 *Impeller*형상 선정에 관한 연구

A Study on Industrial Mixer Choice of Impeller Type by
Concentration Measurement Method, PIV and CFD

指導教授 李 英 浩

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機 械 工 學 科

韓 鐘 奭

本 論文을 韓鐘奭의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長：工學博士 김 유 택 印

委 員：工學博士 유 삼 상 印

委 員：工學博士 이 영 호 印

2006年 12月

韓國海洋大學校 大學院

機械工學科

韓 鐘 奭

목 차

목차	<i>i</i>
Abstract	<i>iv</i>
사용기호	<i>v</i>
 제1장 서론	 1
1.1 연구배경	1
1.2 관련연구	2
1.3 연구의 목적	3
 제2장 이론 및 실험해석	 5
2.1 전산유체역학(CFD)에 의한 이론해석	5
2.2 입자영상유속계(PIV)에 의한 실험해석	18
2.3 전기 저항값에 의한 농도분포 실험해석	28

제3장 결과 및 고찰	34
3.1 전산유체역학(CFD) 해석	34
3.2 입자 영상 유속계(PIV) 실험	40
3.3 농도분포 계측 실험	47
제4장 결론	52
참고문헌	53

감사의 글

*A Study on Industrial Mixer Choice of
Impeller Type by Concentration
Measurement Method, PIV and CFD*

Jong Seok, Han

*Department of Mechanical Engineering
Graduate School, Korea Maritime University*

Abstract

The Industrial Mixers are used in various industrial fields where they are necessary to effectively mix two or more material components in a short period of time. However, despite their wide use, complex unsteady flow characteristics of industrial mixers are not yet systematically investigated. The present study aims to clarify unsteady flow characteristics induced by various impellers in a tank. Impellers are pitched blade turbine(PBT) types, Screw type and Rushton turbine type. To investigate the flow characteristics and mixing efficiency, PIV, CFD and concentration measurement were carried out systematically. PIV measurement gave clear description of 3-D complex mixing phenomena and CFD analysis suggested time-averaged flow patterns not shown in PIV result. Concentration measurement technique was adopted to quantify the mixing efficiency for various operation and type condition. In conclusion, Rushton type gave the more satisfactory result when its impeller is located at middle height.

Nomenclature

C	:	Impeller off-bottom clearance
C_{fg}	:	Cross-correlation coefficient
D	:	Impeller diameter
D_i	:	Impeller coefficient
G	:	Velocity gradient
h	:	Distance above the vessel base
H	:	Total liquid depth
N	:	Agitation speed (RPM)
P	:	Power
R	:	Vessel radius
Re	:	Agitation Reynolds number
t	:	Times
T	:	Vessel diameter
u, v	:	Velocity in the x, y-direction
V	:	Volume
w	:	Blade height
W	:	Impeller blade width
x, y, z	:	Cartesian coordinates

Greek Letters

ρ	:	Density
μ	:	Dynamic viscosity
ν	:	Kinematic viscosity

Superscripts

$-$:	Time averaged
-----	---	---------------

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

최근 산업현장에 사용되는 교반장치는 식품공업, 생화학공업, 금속공업, 수(水)처리 및 환경 관련 공정 그리고 원자력발전소 등 다양한 산업분야에 사용되고 있으며, 혼합되는 물질의 특성에 따라 다양한 종류의 임펠러(impeller)와 교반조(mixer)가 설계되고 있다. 특히 임펠러는 기계동력을 교반에너지로 전환하여 직접액체를 섞어주는 부분으로 임펠러 날개 형상에서부터 회전 밸런스까지 하나하나가 교반 효율에 큰 영향을 미치는 요소이다. 특히 중속회전인 경우에는 임펠러가 교반 성능에 미치는 영향이 매우 크다고 알려져 있다.

교반기 내부 유동장은 임펠러로부터 발달되는 유체전단혼합(fluid shear mixing)과 유체 흐름(fluid flow)의 상호 작용에 의한 날개 끝 와류(tip vortex)의 주기적인 방출, 2차 와류의 순환 및 난류의 발생 등 상당히 복잡한 구조의 3차원 비정상 유동메커니즘을 가진다. 우수한 성능의 산업용 교반기를 설계하기 위해서는 반드시 교반성능에 영향을 미치는 다양한 내부 유동특성의 정량적 실험데이터의 확보가 필요하나, 3차원적 비정상 특성을 나타내는 복잡한 구조의 내부유동특성에 관한 정량적 해석은 현재까지도 상당히 어려운 문제로 남아있다. 이러한 이유로 인해 산업용 교반기와 관련된 연구는 현재도 활발히 진행 중에 있다.

1.2 관련 연구

Chapple과 Kresta[1]는 가시화기법(tuft법)으로 3개의 블레이드를 가진 임펠러에 의한 교반장치에서 유동패턴의 안정성과 임펠러의 위치, 직경과 같은 기하학적 변수의 영향에 대해 연구하였다. Winardi와 Nagase[2]는 유동가시화 기법을 조합하여 선박용 프로펠러의 유동특성을 연구하였으며 다양한 와류의 회전, 순환과 같은 유동현상을 규명하고, 일정한 주기성을 고찰하였다.

Bakker와 Akker[3]는 LDV를 이용하여 피치 블레이드 터빈에 발생하는 유동장의 축방향 속도분포와 유동패턴의 비정상성과 불안정성을 제시하였다.

Haam 등[4]은 일정한 주기를 갖는 교반탱크 내부의 상호 열전달 계수의 크기를 알아내고 이것은 교반탱크의 축방향 와류의 주기적인 유동에 따른 열전달 계수의 변동일 것이라고 보고하고 있다.

Bakker 등[5]은 축방향 임펠러에 의해 교반되는 가스집진기 시스템의 유동현상의 주기성을 고찰하고 변동의 주기와 임펠러의 회전속도의 관계를 규명하였다. Tsurusaki 와 Urata[6]는 디지털 이미지 프로세싱 기법에 의해 교반수조 중앙의 두 단면에서 r - z 와 r - θ 좌표계에 의한 속도를 계측하여, 이미지 프로세싱 기법의 유효성과 유동의 비정상성을 고찰하였지만, 교반 성능에 미치는 영향을 분석하기에는 미흡하였다.

1.3 연구의 목적

본 연구에서는 산업용 혼합 교반기에서 최적의 교반효율을 가지는 임펠러의 형상을 설계하는 것이다. 이를 위해 현재 시판 중인 교반기용 임펠러 모델을 참고하여, 3차원 CAD를 통해 모델링한 후, 생성된 임펠러모델링 데이터를 전산유체역학(CFD)에 적용하여 교반 성능이 우수하면서, 범용으로 사용가능한 교반기 임펠러 형상의 제시할 것이다. 또한 CFD의 결과에 대한 검증을 위해서 PIV 및 교반에 따른 농도 변화를 계측하여 교반의 정도를 파악하는 방법을 개발하고자 한다.

산업용 교반기의 교반효율에 대한 분석을 위해서는 임펠러가 교반효율에 미치는 영향을 분석해야 한다. 따라서 임펠러에 의한 교반기 내부 유동패턴에 대한 이해는 필수적이라고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 다양한 내부유동특성을 살펴보기 위해 현재 산업용으로 사용중인 표준 모델 교반기를 기준으로 3차원 CAD와 전산유체역학(CFD), 유동가시화실험(PIV)을 통해 임펠러형상에 따른 교반기 내부유동 메커니즘을 고찰하였다. 본 연구에서는 임펠러의 형상과 임펠러의 회전 속도(100RPM)에 따른 교반 특성을 파악하였으며 이를 통해 범용으로 사용 가능한 최적형상을 결정할 수 있다고 판단하였다.

한편, 원자력 발전소는 산업용 교반기가 중요하게 사용되는 곳으로 냉각수로 사용되는 해수의 염분으로 인한 배관부식을 방지하기 위해서 봉산을 사용한다. 이를 위해서는 교반기를 이용하여 해수와 봉산을 섞어주어야 하는데 교반에 대한 뚜렷한 기준 데이터가 없기

때문에 단순한 시간경과에 따라 교반이 완료된 것으로 판단하는 실정이다. 이러한 문제점의 개선을 위해 다각도로 연구하고 있다. 본 연구에서는 교반기 내부유동패턴 뿐만 아니라, 자체 설계 및 제작한 농도센서를 이용하여 종래의 정성적인 교반정도를 정량화하여 획득된 데이터를 통해 교반의 정도를 파악하는 방법을 제안하고자 한다.

제 2 장 이론 및 실험해석

2.1 전산유체역학(CFD)에 의한 이론해석

본 연구에서는 임펠러의 형상개발을 위해 CFD를 적용하였으며 상용 CFD 프로그램으로는 교반기와 같은 회전유동에 검증된 프로그램인 CFX를 사용하였다. 하지만 아무리 상용 CFD 프로그램이 검증되었다 해도 적용할 case에 따른 난류모델과 경계조건의 검토가 선행되어야 한다. 또한 교반효율이 최대인 임펠러의 형상 설계를 위해서는 다양한 임펠러에 대한 연구가 선행되어야 하며 이는 결과적으로 ‘① 임펠러형상 모델링→②격자의 생성→③수치해석’의 반복 작업을 수행해야함을 뜻한다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 위해서 제안한 알고리즘을 구현하기 위해서 다음과 같은 방법을 사용하였다.

2.1-1. *Impeller*의 구조

Fig. 2-1은 본 연구에서 정의한 임펠러의 구조에 대한 개략도이다. 그림을 살펴보면 임펠러는 크게 Hub 와 Blade로 구성되어 있다. 본 연구에서는 Blade의 최대거리를 임펠러의 직경으로 정의하였다.

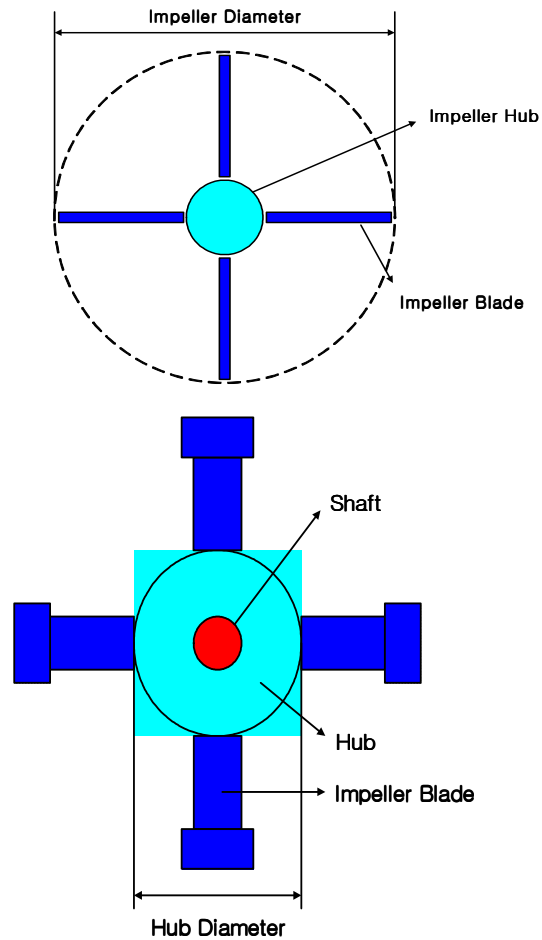


Fig. 2-1 A Summary of Impeller

Fig. 2-2는 Impeller의 끝단 Blade 각(tip Angle)과 Blade와 Hub사이에 이루는 사잇각(hub chord angle)에 따른 분류를 나타낸 것이다. 사전연구 결과 Tip Angel은 90° 에 가까울수록 교반효과가 좋으며, Chord Angles의 이루는 각은 45° 가 90° 인 경우보다 교반효과가 좋은 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 Tip Angle은 Blade와 수직인 90° , 그리고 Chord Angle은 45° 인 경우로 범위로 한정하였다.

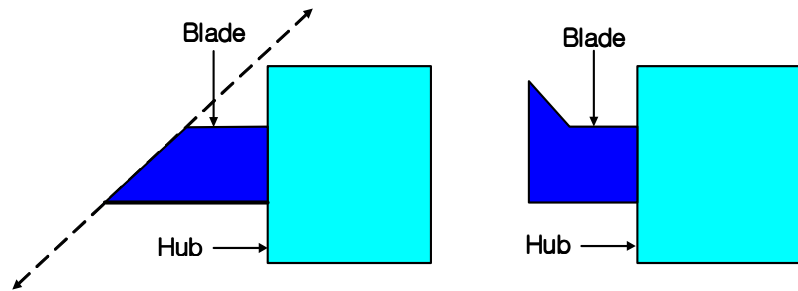


Fig. 2-2(a) Tip Chord Angle

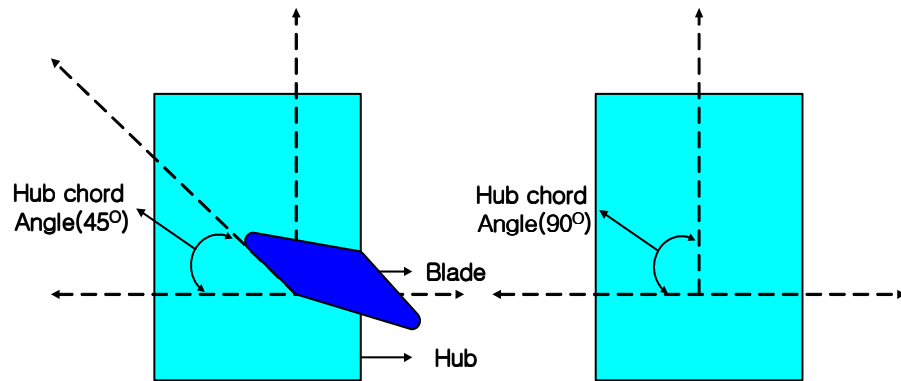


Fig. 2-2(b) Hub Chord Angle

2.1-2. 교반기의 구조

Fig. 2-3은 본 연구에서 사용된 교반기의 구조에 대한 개략도이다.

그림을 살펴보면 교반기(mixing Tank)는 크게 Impeller와 Impeller에 동력을 전달하기 위한 Shaft로 구성되어 있음을 알 수 있다. Impeller의 위치는 교반기내부에 유체를 채웠을 경우 유체수위의 절반으로 기준을 정하였다. Fig. 2-4는 교반기 내부의 유동영역을 도시화한 것이다. 교반기 내부유동영역은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 회전영역(rotational zone)과 비회전영역(cylindrical zone)로 나

눌 수 있다.

이에 3차원 CAD 모델링 시에도 이를 반영하여 회전영역과 비회전 영역으로 나누어 모델링을 수행하였으며, 이의 결과는 Fig. 2-5에 나타내었다.

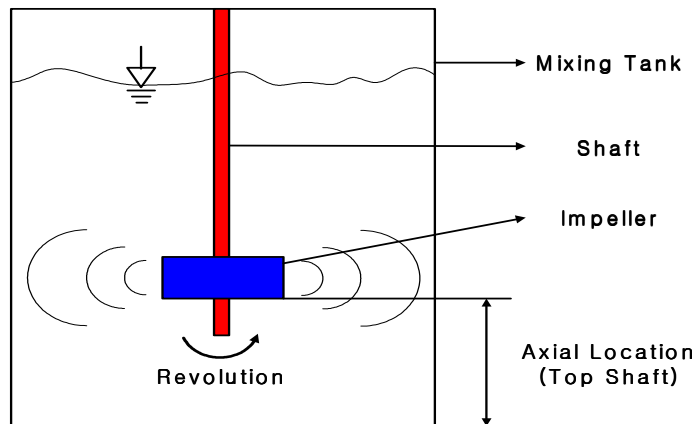


Fig. 2-3 A Summary of Mixer

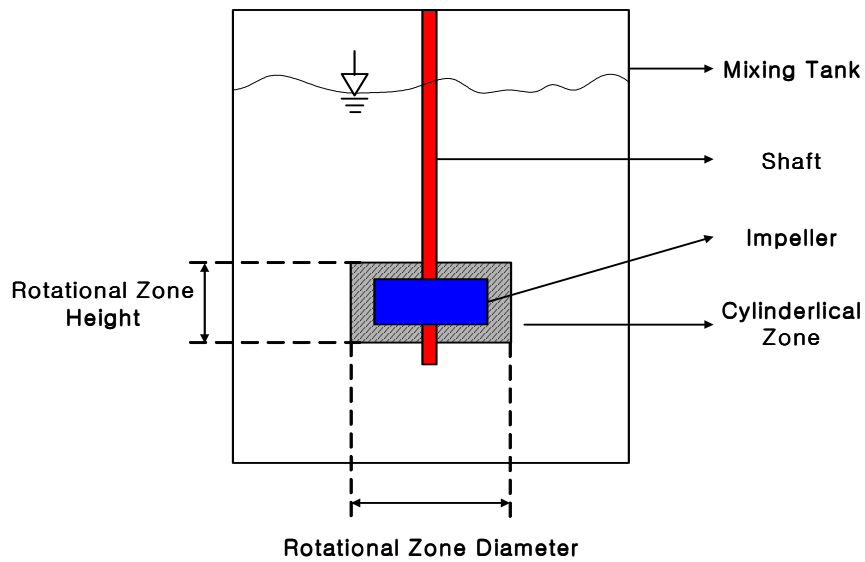


Fig. 2-4 Flow Zone of Inner Mixer

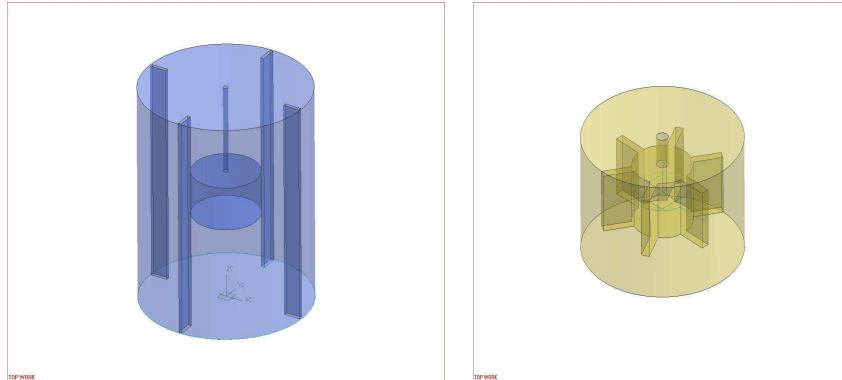


Fig. 2-5 CAD Modeling by Mixer Flow Zone

Fig. 2-6은 교반기내의 임펠러, 자유표면의 위치 및 geometry의 형상을 나타낸 것이다. 임펠러의 직경은 각각의 임펠러 모두 340mm이다. 교반기는 직경 180mm, 높이 250mm의 크기이며, Impeller의 중심은 교반기 바닥으로부터 100mm 간격을 두고 설치되었으며, 교반조 외벽에 방사형으로 설치된 배플(baffle)의 폭은 각각 80mm이다. 가시화를 위하여 원통형 수조를 투명 아크릴로 제작하여 지면으로부터 높이 200mm까지 상온수를 채웠다.

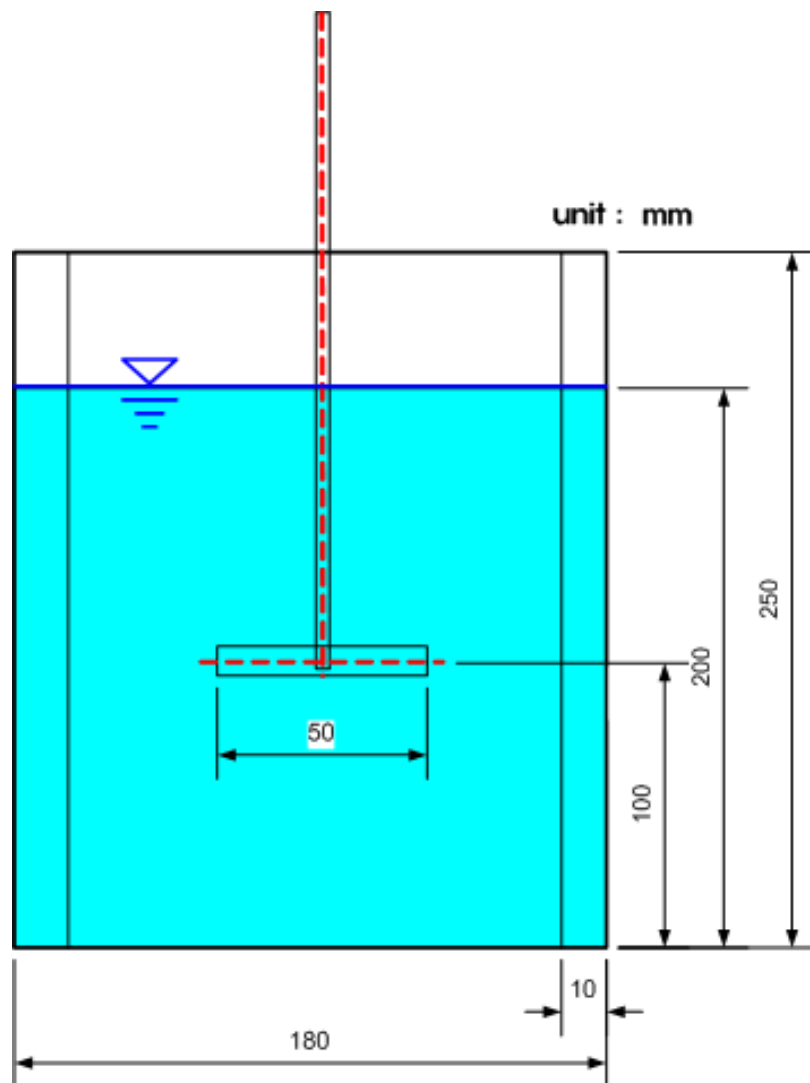


Fig. 2-6 Dimension of Experimental Apparatus

2.1-3. 임펠러 모델의 선정



Fig. 2-7 Impeller of Three Type

Fig. 2-7은 본 연구에 적용된 세 가지 형태의 산업용 교반기에 사용되는 임펠러의 실제 모델 사진을 나타내었다. Pitched blade turbine type의 I 임펠러는 radial flow보다는 효율적인 흐름을 가지며, 프로펠러 임펠러보다는 유체 전단율이 높다. 일정한 수준의 유체흐름속도와 유체전단율이 동시에 요구될 때, 사용되며 프로펠러 임펠러 사용 시에 임펠러 직경이 지나치게 크게 설계될 때 효과적이다. Rushton turbine type 임펠러는 교반영역 내에서 크고, 국부적인 전단율을 최소화시켜 교반조 전체에 토출되는 유체 전단율을 일정하게 만드는 흐름을 발생시키며, 소요 동력이 낮으며 펌핑(pumping)압이 높아 교반조 내의 고른 부분에 교반흐름이 미치며 교반강도가 작아서 저속교반용에 적합한 형태이다.

2.1-4. 3차원(3-Dimension) CAD Modeling

본 연구에서는 3차원 CAD 프로그램을 이용하여 임펠러 형상을 모델링하였다. 모델링된 형상데이터를 이용하여 임펠러의 피치각에 따른 새로운 임펠러 모델을 개발하였다.

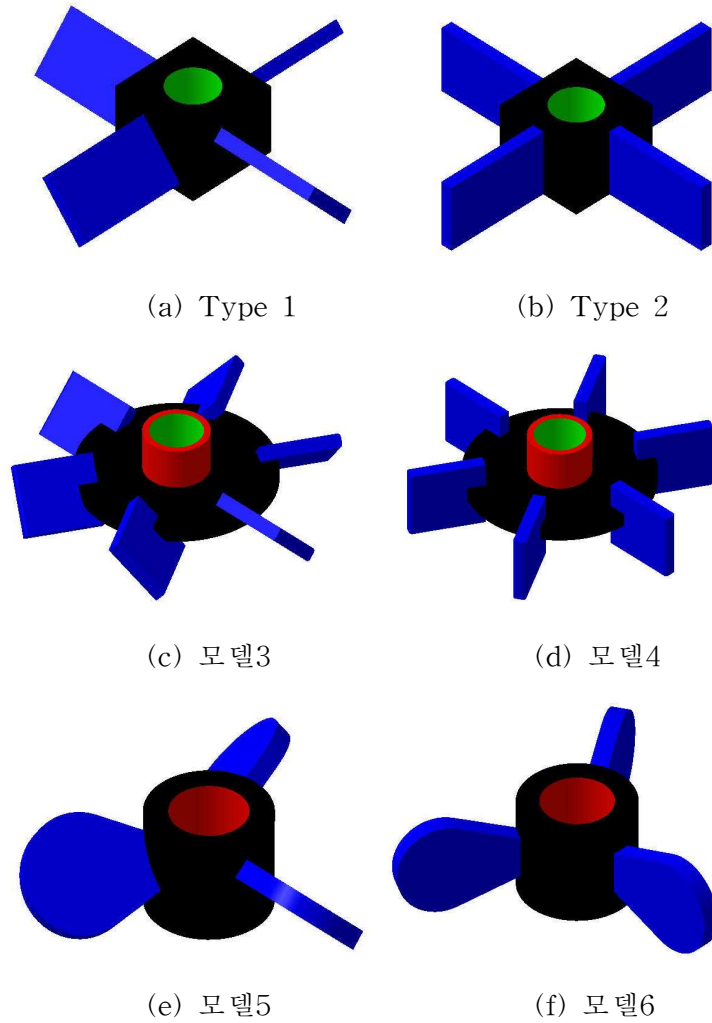


Fig. 2-8 Modeling Figure of Variety Impeller

2.1-5. 교반기와 임펠러의 격자생성

전산유체역학을 이용한 수치해석에서는 무엇보다도 격자(mesh)생성이 대단히 중요하다. 본 연구에서는 격자의 생성을 위해서 상용 프로그램인 ICEM CFD를 사용하였다. 기존의 CFD의 연구추세가 간단한 형상은 단일 HEXA mesh를, 보다 복잡한 형상에 대해선 단일 TETRA mesh로 구성하였다. 하지만 계산정도와 시간, 후처리결과처리의 용이성 등 여러 가지 이유로 HEXA mesh가 좋다고 알려졌으나, 복잡한 형상에서 HEXA mesh를 구성하는 것이 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서 최근의 CFD 연구추세는 HEXA mesh와 TETRA mesh의 장단점을 보완하는 HYBRID mesh를 구성하여 연구를 수행하고 있다. 이에 본 연구에서는 교반기는 HEXA mesh로 구성하였고, 임펠러 부분은 TETRA mesh로 구성하였다. 이를 통해 다양한 임펠러 형상에 대해서도 mesh 생성에 별다른 어려움 없이 적용할 수 있으며 이는 산업현장에서도 쉽게 적용할 수 있는 방법이다.

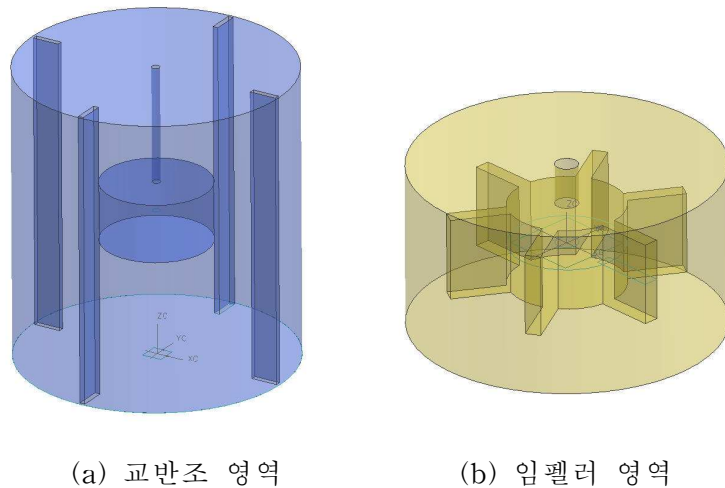
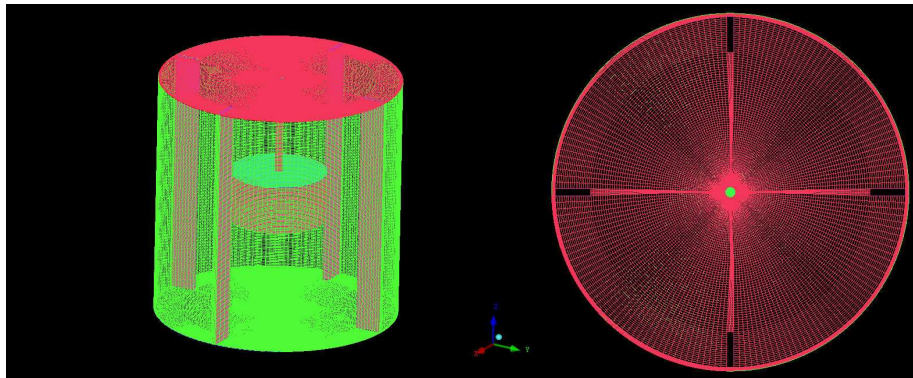
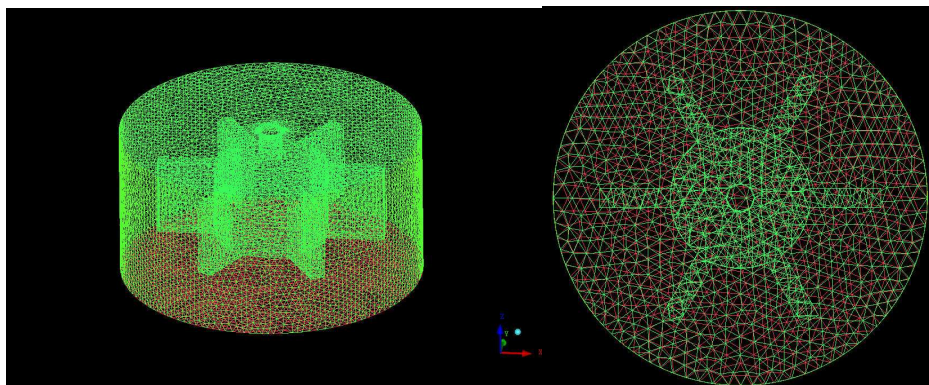


Fig. 2-9 Parted Modeling Figure by 3D CAD



(a) Mesh of Mixing Tank



(b) Mesh of Impeller

Fig. 2-10 HYBRID Mesh Figure of Parts

2.1-6. Solver(CFX)에서의 두 영역 결합

수치해석을 위해서 CFX를 사용하였다. CFX는 그동안 선행연구에서 검증된 상용코드로 알려져 있다. 수치해석을 위한 과정에서 각각 구성된 교반조부와 임펠러 부를 interfacing 하면 하나의 유동장 영역으로 인식하게 된다. 따라서 이러한 방법을 사용하게 되면, 동일한 형상을 가지는 교반조부에 대한 반복 작업 없이 임펠러부에 대해서만 모델링과 격자생성작업을 하면 된다. 또한 HYBRID mesh를 사용할 경우 유동이 급격하게 변할 것으로 예상되는 임펠러부에 대한 re-meshing 작업 역시 간단하게 이루어질 수 있는 장점이 있다.

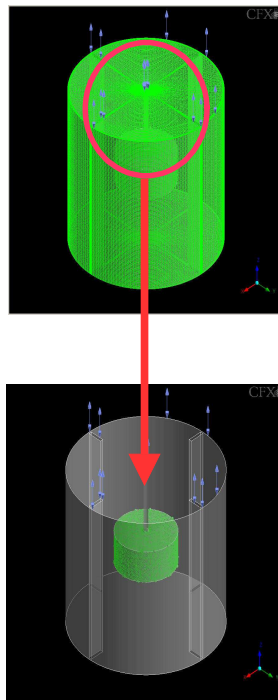


Fig. 2-11 Union of Two Parts by Solver(CFX)

2.1-7. 수치해석에서 사용된 조건

1) 좌표계

지배방정식은 기본적으로 Cartesian 좌표계를 전역좌표계를 택해 유도되어져야한다. 교반기와 같은 임펠러와 같은 복잡한 형상에 대한 해석은 일반 곡선좌표계를 도입하여 좌표계를 구성하여야한다.

2) 난류모델

- CFX는 비압축성 난류유동의 해석에 3차원 Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식과 연속방정식을 지배방정식으로 하며, 이는 유한체적법에 의해 이산화된다.

- CFX에서 제공하는 대류항의 이산화기법으로 UDS (Upwind Differencing Scheme)와 MWS (Mass Weighted Skewed upstream differencing scheme), LPS(Linear Profile Skewed upstream differencing scheme), 그리고 수정(Modified) LPS기법이 있으며, 교반기 해석에서는 대부분의 유동에서 안정적이고 2차의 정확도를 가지는 MLPS를 적용하였다

- 난류모델은 CFX에서 제공하는 $k-\omega$ 난류모델을 사용하였다.

- CFD를 통한 교반기의 Impeller의 해석에 있어서 적절한 가정을 통하여 수치계산에 소요되는 시간과 비용을 현저히 줄일 수 있다. 실험계수를 이용한 임펠러 성능해석에서는 유동이 정상적이고 주기적이라는 가정을 하였으며 이는 임펠러를 구성하는 각각의 날개 영역이 동일함을 의미한다. 그러므로 하나의 날개 영역만을 해석하였다. 그러나 안내 깃과 임펠러를 포함한 입형 다단 원심펌프를 수치 해석할 경우 수치영역의 모호한 경계면 설정 때문에 주거조건을 적용하지 않고 다단펌프의 전체영역에 대하여 수치해석을 수행하였다.

- 사용된 경계조건으로 입구경계에서는 동일 압력 조건을 주었으

며 출구에서는 동일유량조건을 지정하였다. 본 수치계산의 경우 계산 영역 안에 회전부와 정지부를 갖고 있으므로 MFR(Multiple Frame of Reference)를 사용하였다. 따라서 임펠러를 포함하는 회전부의 벽은 상대좌표계에서 정지된 매끄러운 벽으로 처리하였으며 디퓨저를 나타내는 정지부의 벽은 절대 좌표계에서 정지된 매끄러운 벽으로 취급하였다. 여기서 회전부와 정지부 사이의 경계면에서 정보 전달 방법은 “Frozen Rotor” 방식을 사용하였다.

3) 벽법칙

- 표준 $k-\omega$ 난류모델에 벽법칙을 사용하기 위해서는 y^+ 가 30보다 큰 로그 영역에 첫 번째 격자점이 존재하도록 하는 것이 좋다. 그러나 교반기 내에서 경계층 형성이 넓은 범위를 가지므로 이러한 조건은 항상 엄격히 유지 될 수는 없다. 이러한 점을 보완하기 위해 $k-\omega$ 난류모델에는 수정된 벽법칙 (Fixed y^+ wall function)이 사용하는 것이 좋다. 이는 조밀한 격자를 사용할 경우에 발생하는 벽법칙의 모순을 피하기 위해 계산된 y^+ 가 층류저층의 경계면의 값인 11이하가 되지 않게 제한하여 모든 격자점이 층류저층 바깥에 위치하게 된다.

2.2 입자영상유속계(PIV)에 의한 실험해석

2.2-1. PIV 원리

유체의 유동특성을 파악하는 실험으로는 유동 가시화 실험이 보편적으로 사용된다. 이 방법은 유체유동을 직관적으로 이해하기 쉬운 결과를 얻기가 비교적 용이하다는 장점을 가지고 있기 때문에 구체적이고 복잡한 유동장도 쉽게 이해할 수 있다. 이러한 특성으로 인하여 유동 가시화 실험은 유체의 유동특성을 파악하는 하나의 도구로 많이 사용되었다. 그러나 이 방법은 이러한 장점에도 불구하고 역학적인 해석에 필수 불가결한 요소인 정량적인 데이터의 부족으로 인하여 수치해석에 의한 데이터를 보조하는 수단으로 사용된 바가 없지 않다. 따라서 공학적인 측면으로 볼 때 유체계측이 보다 중요한 위치를 차지하고 있다. 지금까지 유체계측에 있어서 속도를 얻기 위한 방법으로는 열선유속계를 사용한 국소적인 유동해석으로부터 LDV와 같이 레이저를 이용한 측정방법이 주로 사용되었다. 이러한 점계측 속도측정기법은 신뢰성과 정도 면에서 우수한 성능이 입증되었으나 계측기법 고유의 문제점 때문에 유동현상의 기본적인 특징인 비정상 유동에서는 동시다점계측이 기본적으로 불가능하다. 이러한 배경 하에서 가시화 기법과 디지털 영상처리기법을 접목한 PIV가 새로운 기법으로 1980년대 초반부터 소개되었으며, 최근에는 이에 대한 응용과 연구가 더욱 활발해져, 계측기법 중 전산유체역학에 대응할 수 있는 유력한 계측기법으로 각광을 받고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 장점을 가지는 PIV를 유동측정 방법으로 선택하여 사용하고자 한다. PIV의 기본원리는 입자의 입자운동에 요하는 시간간격 및 변

위벡터의 관계로부터 구할 수 있다. PIV는 벡터해석방법에 따라 크게 개별입자추적(discrete particle tracking) PIV와 입자분포상관(particle distribution correlation) PIV로 나눌 수 있다.

세부적으로 보면, 개별입자추적에는 조명부호(illumination code) PIV와 개별도심좌표(discrete centroid) PIV가 있고, 입자분포상관 PIV에는 자기상관(auto-correlation) PIV, 상호상관(cross-correlation) PIV가 있다. 본 논문에서는 상호상관법을 이용하여 속도분포를 구하였으며 그 원리는 다음과 같다. Fig. 2-12는 계조치상관법의 원리를 도시한 것이다. 그림에서 미소시간 동안 유동장의 화상의 계조치 패턴은 크게 변화하지 않는다고 가정하면 제1화상에서 상관영역내의 계조치 분포와 미소 시간 후 제2화상에서의 계조치 분포는 유사한 형태를 보일 것이다. 제1화상에서 임의의 위치를 중심으로 하여 제2화상에서의 같은 크기를 갖는 영역에서 계조치에 대하여 다음 식 (1)과 같은 상호상관계수 값을 원으로 표시된 탐색영역 내부에서 구하여 비교한 뒤 그 중 가장 큰 값을 가질 경우의 제2시각에서의 탐색영역 내의 점을 동일입자군의 이동위치로 간주할 수 있다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} \sum_{j=1}^{n^2} (f_{i,j} - \overline{f_{i,j}})(g_{i,j} - \overline{g_{i,j}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} \sum_{j=1}^{n^2} (f_{i,j} - \overline{f_{i,j}})^2 \sum_{i=1}^{n^2} \sum_{j=1}^{n^2} (g_{i,j} - \overline{g_{i,j}})^2}} \quad (1)$$

여기서 $f_{i,j}$, $g_{i,j}$ 는 상관 영역내의 각 화소의 계조치를 의미하여 “-”는 평균을 의미한다.

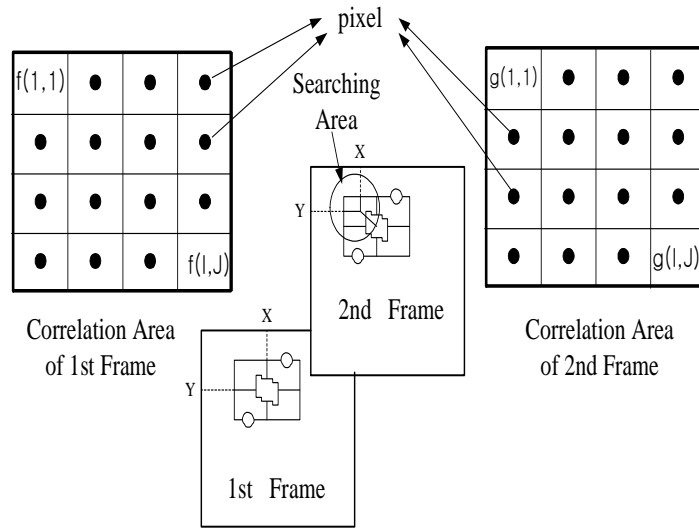
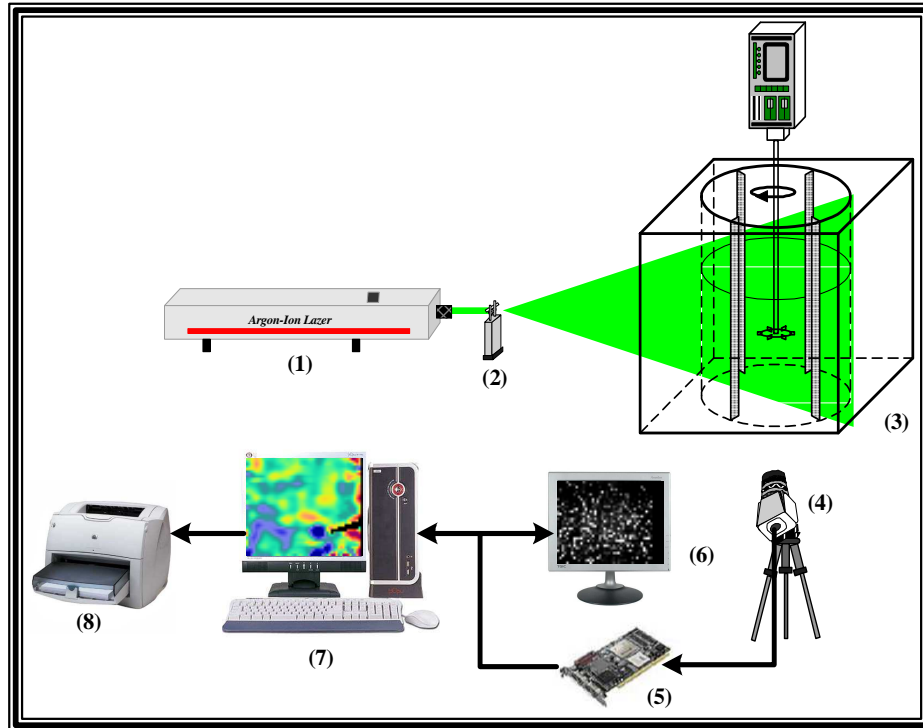


Fig. 2-12 Principles of Gray Level Correlation

계조치 상호상관법을 적용할 때 탐색반경(searching area radius)과 상관영역(correlation area size)의 설정은 속도벡터의 신뢰성 뿐만 아니라 계산시간의 단축에도 결정적인 영향을 미친다. 본 연구에서의 계측영역 격자수는 모든 경우에 대하여 $I=80$, $J=40$ 이고, 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 9~10픽셀이다. 그리고 상관 영역의 크기는 40~45픽셀 정도로 하였다.

2.2-2. 실험장치 및 실험방법



(1) Argon Ion Laser (6W) (2) Aspheric Lens (3) Agitator Model (4) Hi Speed Camera (1280X1024) (5) Image Grabber (1Giga Memory) (6) Monitor for Hi Speed Camera (7) Main Computer (8) Laser Printer

Fig. 2-13 Schematic Arrangement of PIV System

Fig. 2-13은 PIV 실험장치 개략도를 나타내었다. 본 연구에 사용된 PIV 시스템은 조명으로 연속광 레이저(6W, Ar-Ion)를 이용하였으며,

2mm 미만의 얇은 두께의 레이저 평면 광을 계측단면에 적절히 조사하기 위하여 원통형 비구면 렌즈(Aspheric lens)를 사용하였다. 영상 입력장치로써, 시공간 분해능이 우수한 고속도 카메라(1280[H]×1024[V], Photron.,CO.LTD)를 이용하였다. 임펠러가 교반기 내부 유동장을 완전 발달시킨 후부터, 설치된 임펠러의 형태와 회전속도 변화에 따라 125~500frame/sec의 영상을 연속적으로 획득하였다. 작동유체로써 상온의 수도수를 이용하였으며, 교반조 내부유동장의 가시화를 위해 추종성과 산란성이 우수한 평균직경 100 μ m인 구형 PVC(poly vinyl chloride) 입자를 사용하였다. Fig. 2-14는 PIV를 이용하여 실험을 수행하는 광경을 나타낸 것이며, Fig. 2-15는 전체 실험 장치를 나타낸 것이다.

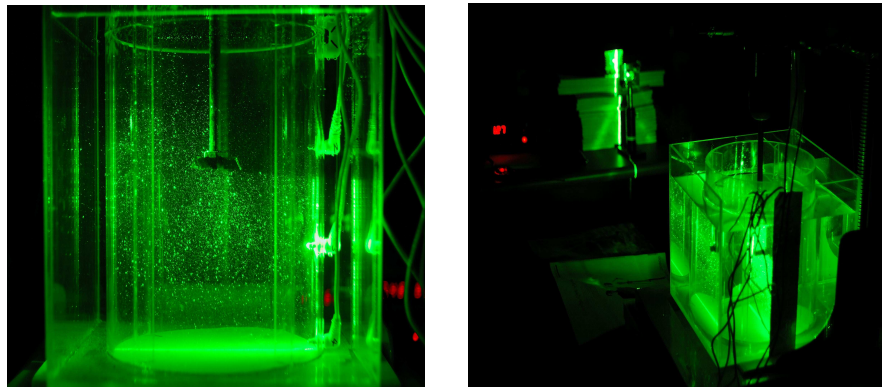


Fig. 2-14 PIV Experiment

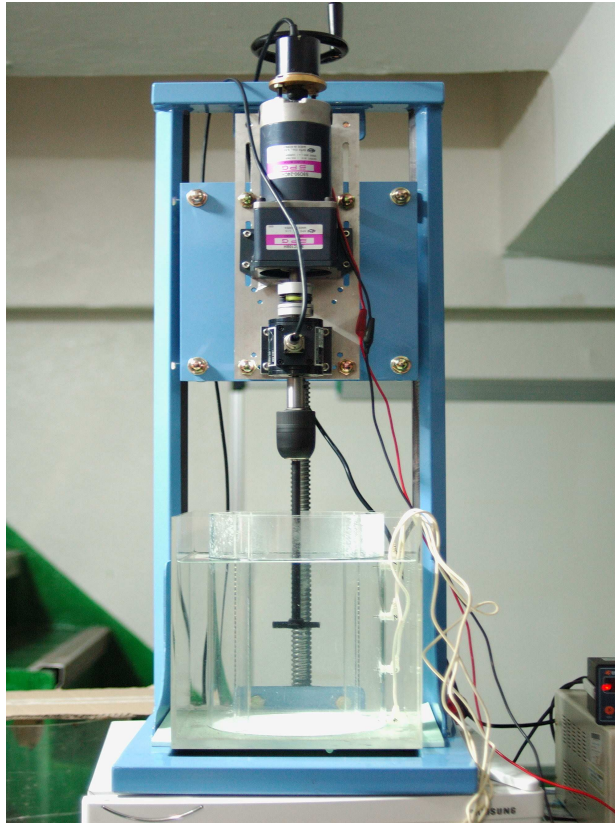


Fig. 2-15 Impeller Test Experimental System

실험은 임펠러 회전속도 변화에 대한 교반기 내부 유동특성 변화를 파악하고자 Pitched blade turbine type Impeller, Propeller type Impeller 그리고 Rushton turbine type Impeller 에 대해서 회전속도를 10~150 rpm 의 범위에서 각각의 Impeller에 대해 모두 10회의 계측을 수행하였으며, 이때 Impeller의 회전수는 독립적으로 설치된 'G' 콘트롤러에 의해 제어된다. 회전 축 중심을 기준으로 유동장은 좌우대칭 조건을 만족하므로 단일 단면에 대한 계측을 수행하였으며, 계측영역은 교반기 바닥으로부터 110mm×250mm의 영역을 가진다.

Table 1에 실험조건을 나타내었으며, Table 2에 계측조건을 나타내었으며 PIV구현을 위한 processing 알고리즘은 Fig. 2-16에 나타내었다.

본 연구는 유동장의 속도를 2차원 PIV에 의해 동시다점으로 계측하여 구하였으며 이를 위한 원시영상처리는 디지털 영상처리기법을 기준으로 행하였다. 계측영역은 교반수조의 수직면(r - z 좌표)의 2차원 단면으로 각 계측영역에 대하여 임펠러의 종류, 회전수를 각각 변화시켜 가면서 순간속도벡터와 평균속도벡터, 그리고 운동에너지 등을 구하여 이에 대한 유체역학적 고찰을 행하였다. PIV 계측결과 순간의 속도벡터가 영역별로 독특하게 존재하였고 축방향 및 반경방향의 거리에 따라 속도분포도 다르게 형성되었다. 특히 유동장의 다양한 유동특성을 일관성 있게 파악하기 위하여 제반 시간평균 결과를 비교한 결과 두 유동장에서 Impeller 축을 중심으로 좌우대칭인 속도분포와 주기적인 와류의 방출, 이에 따른 2차 와류의 순환 및 유입(entrainment)등의 주기적인 변동이 활발하게 나타났다.

이와 같이 Impeller의 형상에 따른 교반장치 내부의 다양한 유체역학적 현상을 PIV계측기법으로 임의의 순간에 동시다점 계측하여 제반 순간 및 평균 유동특성을 시계열 분석을 통하여 교반기 내부의 유동특성을 고찰하였다.

< Table. 1 Experimental conditions >

Item	Specification
Light source	5W Ar-Ion laser
Sheet light	<i>Aspheric</i> lens
Working fluids	Tab water(15°C)
Trace particles	PVC(100μm)
Image recording	High speed CCD camera (1280×1024)
Time resolution	125 ~ 500fps
Identification	Gray-level cross correlation
Image process	Cactus 3.1
Host computer	Pentium 4 1.8GHz
Error rate	Less 1%/frame

< Table. 2 Measurement condition >

Model	Experimental condition	
Type 1	Diameter(ϕ)	50
	Rotational speed(RPM)	10 , 50 , 100
	Measurement region(mm)	110(H)×250(V)
Type 3	Diameter(ϕ)	50
	Rotational speed(RPM)	10 , 50 , 100
	Measurement region(mm)	110(H)×250(V)
Type 6	Diameter(ϕ)	50
	Rotational speed(RPM)	10 , 50 , 100
	Measurement region(mm)	110(H)×250(V)

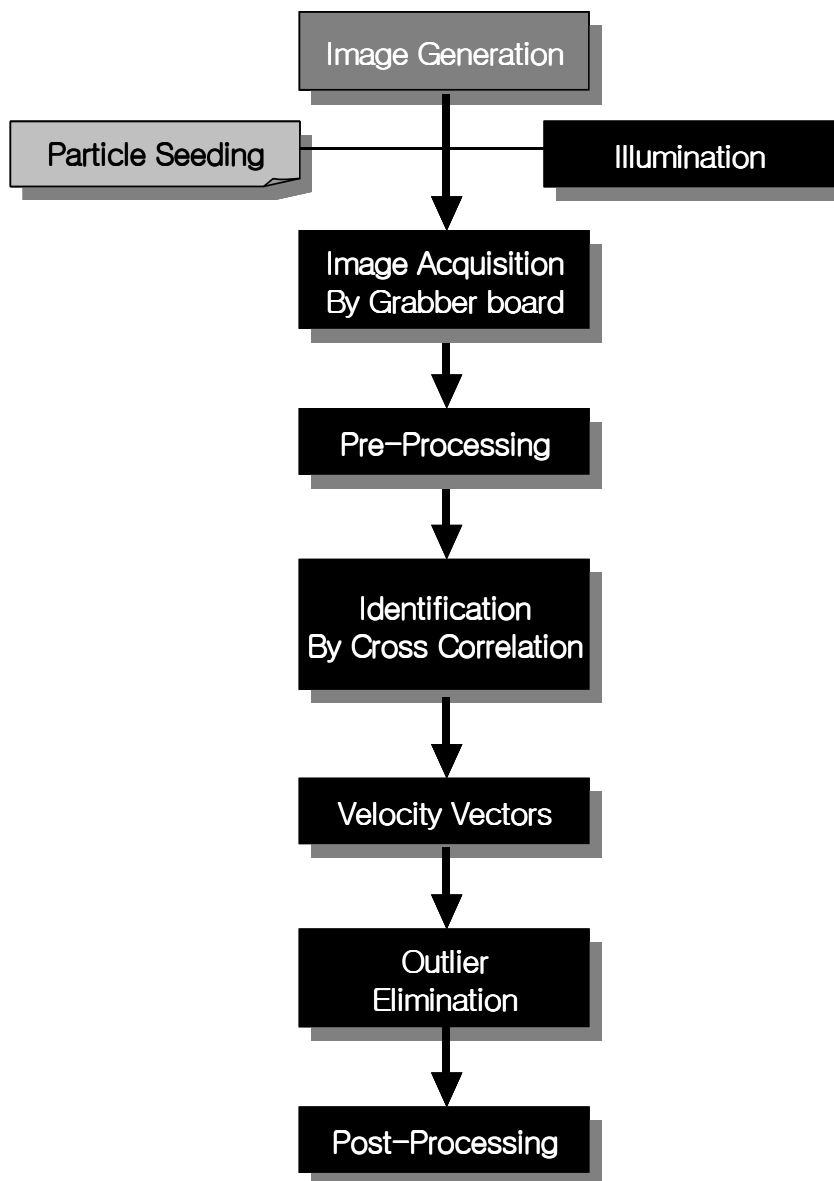


Fig. 2-16 Flow Chart of PIV Processing

2.3 전기 저항값에 의한 농도분포 실험해석

일반적으로 산업용 교반기는 교반하고자 하는 내용물에 따라 적정한 회전수를 정한 후, 그 정해진 회전비로 혼합물을 회전시켜 교반을 실시하는 것으로, 교반을 실시하는 동안 투입되는 내용물의 양과 농도가 항상 일정 할 경우는 충분한 교반 효율과 결과를 얻을 수 있어 가장 바람직한 방법이 될 수 있지만, 수처리장 이나 기타 교반하고자 하는 목적물의 농도가 일정하지 않아, 수시로 변하는 혼합물일 경우에도 항상 일정한 회전수로만 회전시킨다면 양호한 교반을 기대하기 어렵게 된다. 즉, 정해진 회전수가 가지는 교반 능력보다 농도가 높은 혼합물이 투입될 경우는 침전, 침강 및 석화현상 등이 발생하여 교반효율이 떨어지게 될 것이고, 이에 반하여 농도가 낮은 혼합물이 투입될 경우는 모터에 전달되는 동력의 낭비로 이어지게 되는 등 비합리적인 방법이 될 수밖에 없다. 따라서 종래 교반기는 내부의 목적물의 교반상태 및 농도를 정확히 확인할 수 없을 뿐만 아니라 그 운전 또한 대략적인 경험에 의한 고정적인 운전시스템으로 하는 것이 보편적이다. 따라서 종래의 교반기는 일정기간 사용하게 되면 교반조 내에서 목적물의 침전에 따른 퇴적, 부패와 석화현상이 발생하여 교반 목적에 대한 처리 용량 축소와 더불어 교반 효율 저하로 이어지는 등 상당한 문제점을 가지고 있었다. 또한, 교반조 내 목적물 함수율의 변화가 어느 정도 크게 발생할 경우, 이로 인해 침강방지능저하, 혼합의 불균형 및 적용될 소요동력 낭비 등으로 이어져 단순한 일부분의 목적물뿐만 아니라 프로세스 전반적으로 문제점을 야기 시켜 막대한 손실을 초래하는 등 많은 불편함이 있어 왔다.

종래의 기술에서도, 상기의 문제점을 보완하고자 교반기의 농도를 수면위의 농도센서를 통해서 계측하는 방법이 사용되고 있지만 이러한 방법은 교반기의 용기가 큰 경우 수시로 계측이 곤란하며, 교반중 계측을 한다면, 센서의 프루브(probe)가 하나의 장애물로 작용하여 교반효과에 영향을 줄 수도 있다. 또한 이러한 종래의 농도계측방식은 순간점 계측에 한정되며, 계측된 데이터를 수치화하는데 상당한 불편함이 있을 뿐만 아니라, 교반기내부의 전체적인 농도의 분포와 경향을 살펴볼 수 없는 등 많은 단점이 있었다. 또한 농도계측 방법으로 기존의 실험에서 교반성능 측정방법인 Impeller구동축의 토오크를 측정한 후, 이를 근거로 동력을 계산하여 교반성능의 잣대로 삼았다. 하지만 이러한 방법은 토오크를 측정하기 위한 고가의 계측장비가 필요하고, 또한 토오크 측정 계측장비는 토오크 범위에 따라 민감하게 반응하므로 현장에서 적용하는 데에는 애로사항이 있는 것이 사실이다.

이에 본 연구에서는 유체의 탁도를 미세전류를 도통하였을 때 발생하는 저항차를 통해 측정하는 농도계측센서를 도입하여, 이를 교반기 벽면의 여러 지점에 부착하여 각 지점에 계측되는 농도 값이 일정범위에 도달하면, 교반이 완료된 것으로 판단하였다. 농도계측센서의 저항치는 충분한 보정과정을 통해 검증하였으며, 계측된 신호를 감지하면서 교반기 성능의 척도로 시도해 보았다.

2.3-1. 실험장치 및 실험방법

불순물이 없는 순수한 유체인 경우 전기가 통하지 않는 상태이기 때문에 전기저항은 무한대 이다. 이 상태에서 불순물이 첨가되면 전기저항이 낮아지게 된다. 이렇게 하여 혼합유체내의 전기 저항률은 혼합유체각지점에서 전기저항 값이 달라진다.

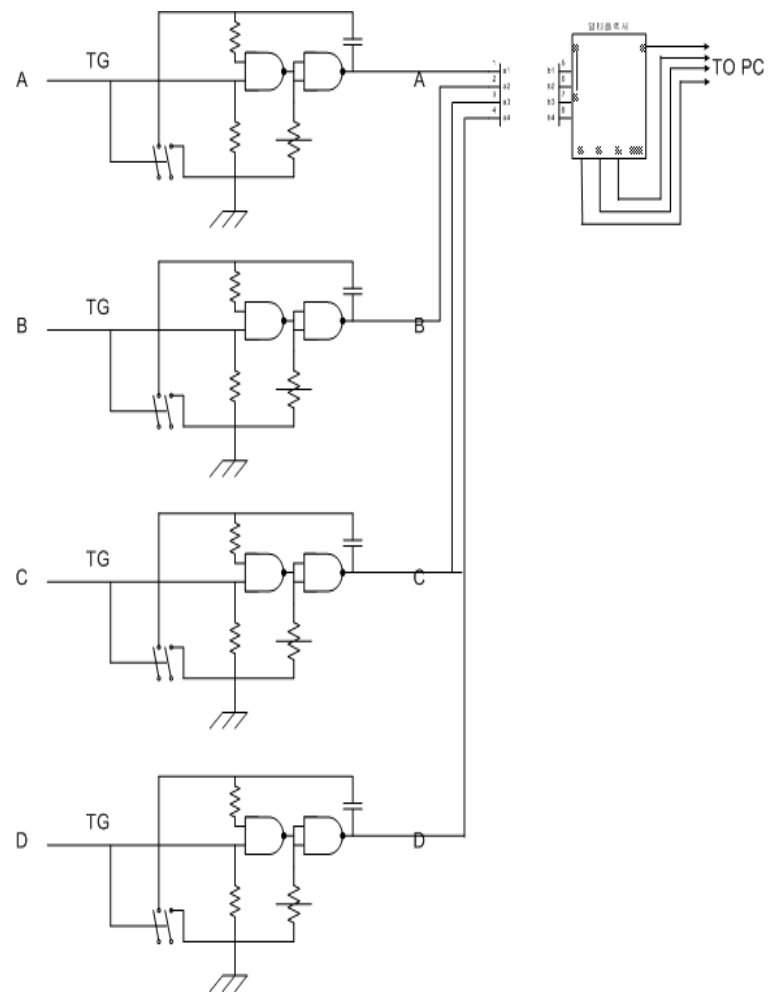
본 연구에서는 이러한 원리를 이용하여 교반기내부의 농도에 따라 교반의 효율을 판단할 수 있는 농도감지장치를 개발하였다.

Fig. 2-17은 본 연구에서 개발한 농도감지장치의 회로도를 나타낸 것이다. 즉 혼합유체내의 전기 저항률은 혼합유체각지점에서 전기저항 값이 달라지는 원리를 이용하여, 교반기 벽면에 4개의 지점에 농도감지센서를 부착하여 4개 지점의 농도의 변화를 관찰하였다. 농도에 따라 전기저항 값이 다르므로, 이때 발생하는 전기저항 값을 펄스로 변환하여 주파수가 빨라지도록 장치를 구성하여, 통전률이 높아지면 주파수도 같이 높아지게 되어있다.

각각 다른 지점에서 나오는 주파수를 다시 ATMEGA128chip을 사용하여 이것을 수치로 변환하여 RS-232C를 통하여 최종적으로 사용자의 컴퓨터에 전달한다. 여기에 본 연구에서 개발한 신호처리 소프트웨어를 통하여 이러한 주파수의 변화를 그래프로 확인이 가능하며 저장시 수치를 시간대별로 저장이 가능하여 데이터를 확보할 수 있다. 즉 교반기의 수면 위가 아닌 교반기 내부벽면에 4개의 농도감지센서를 설치하고, 이 농도감지센서를 통해 시간차를 두고 순서대로 각각 측정된 교반 진척도와 농도의 변화를 수치화하여 실시간으로 확인 할 수 있게 함으로서, 교반기 내부의 전체적인 농도의 분포와 경향을 용이하게 파악할 수 있는 것이다. 이렇게 하여 순수한 물이 담긴 교반기내부에 불순물(본 연구에서는 붕산)이 처음 주입되어 농

도감지센서가 부착된 각 지점에서의 농도분포는 다르므로, 각 지점 주파수가 변화한 후, 일정시간(10초)까지 측정하였다. 이 때 농도분포선도에 나타난 농도분포가 안정화되는 시간을 교반 완료시간으로 설정하였다.

Fig. 2-18은 교반기에 부착된 센서의 위치를 나타낸 것이다. 교반기벽면을 4개의 부분으로 분할하여 상부를 Point 1에서 하부를 Point 4순서로 하였다. Fig. 2-19는 농도계측 실험 장치를 나타낸 것이다.



*Fig. 2-17 Circuit Diagram about Concentration
Measurement Sensor*

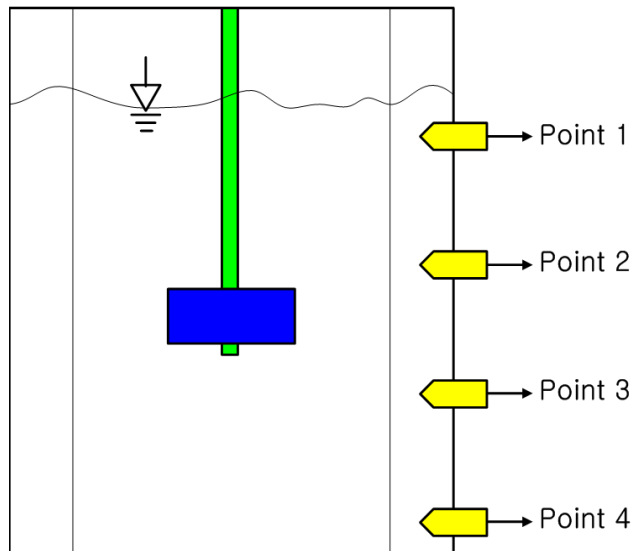


Fig. 2-18 Location about Concentration Measurement Sensor

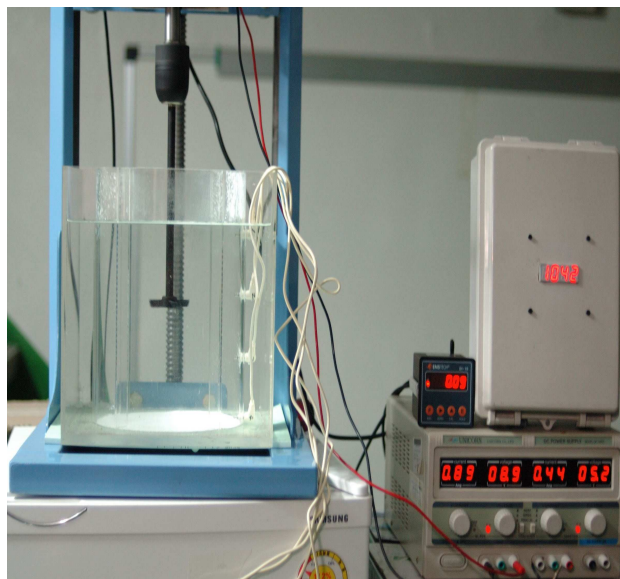


Fig. 2-19 Experiment Apparatus about Concentration Measurement System

제 3장 결과 및 고찰

3.1 전산유체역학(CFD) 해석

Fig. 3-1 ~ 3-25는 다양한 Impeller형상에 대한 수치해석결과를 속도벡터와 유선으로 나타낸 것이다.

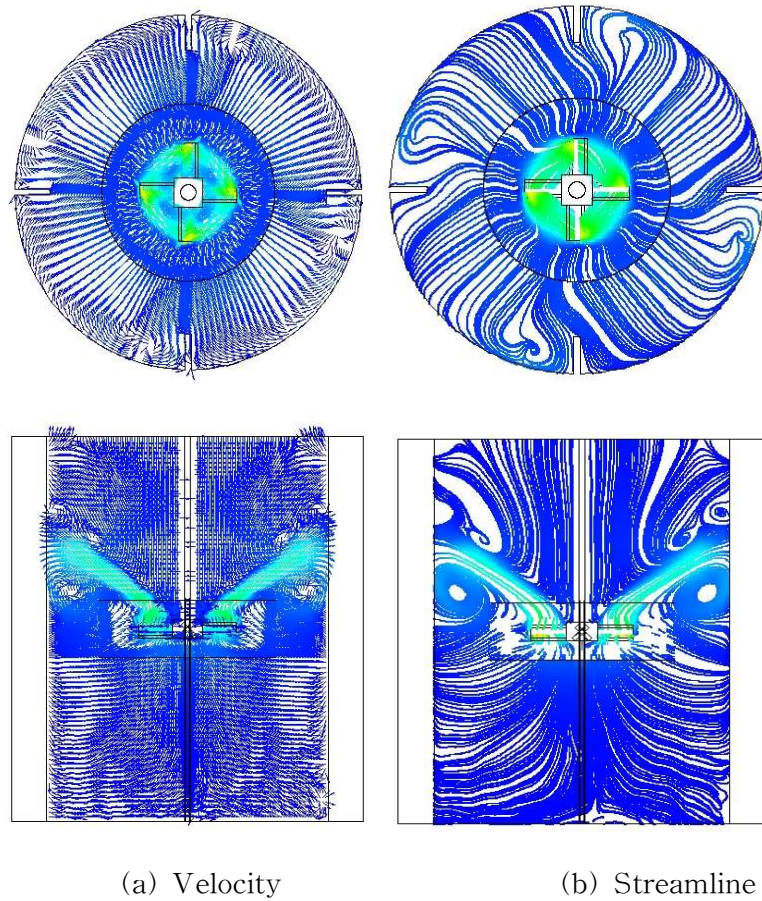
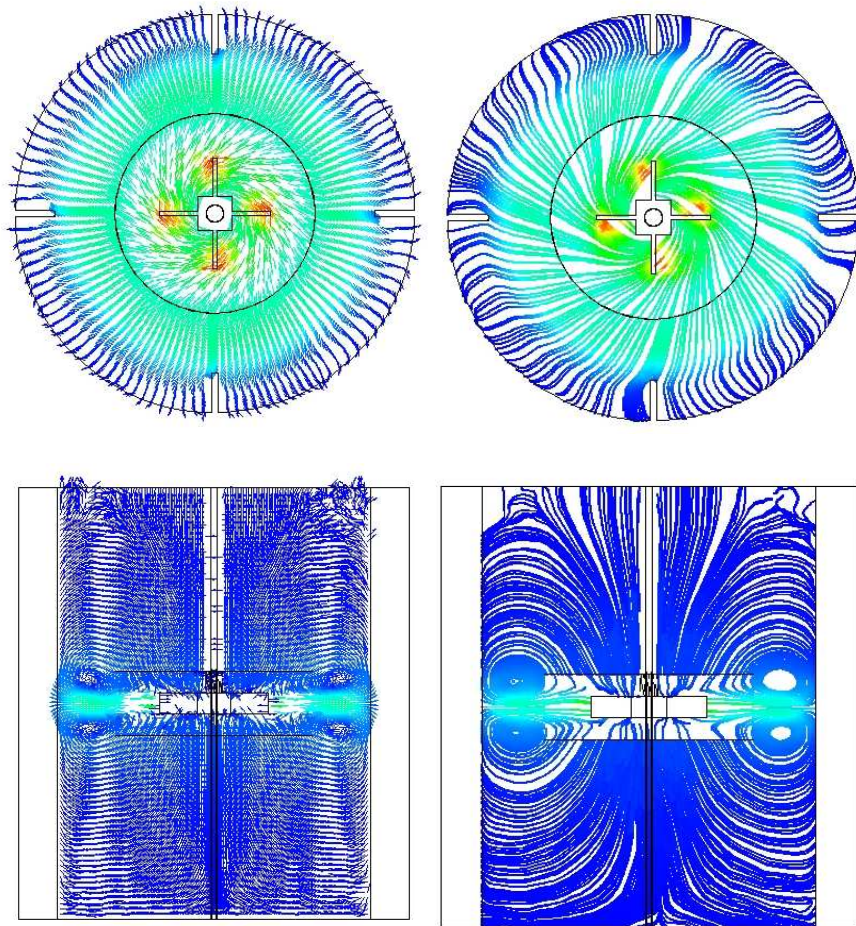


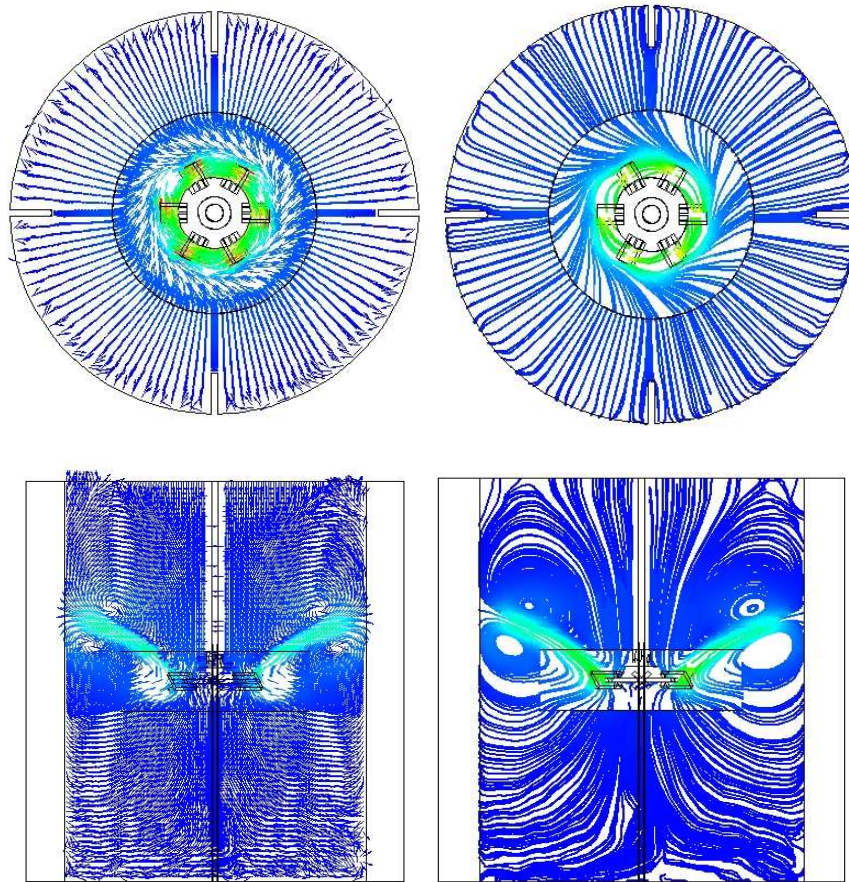
Fig. 3-1 Velocity and Streamline Plot of Type 1



(a) Velocity

(b) Streamline

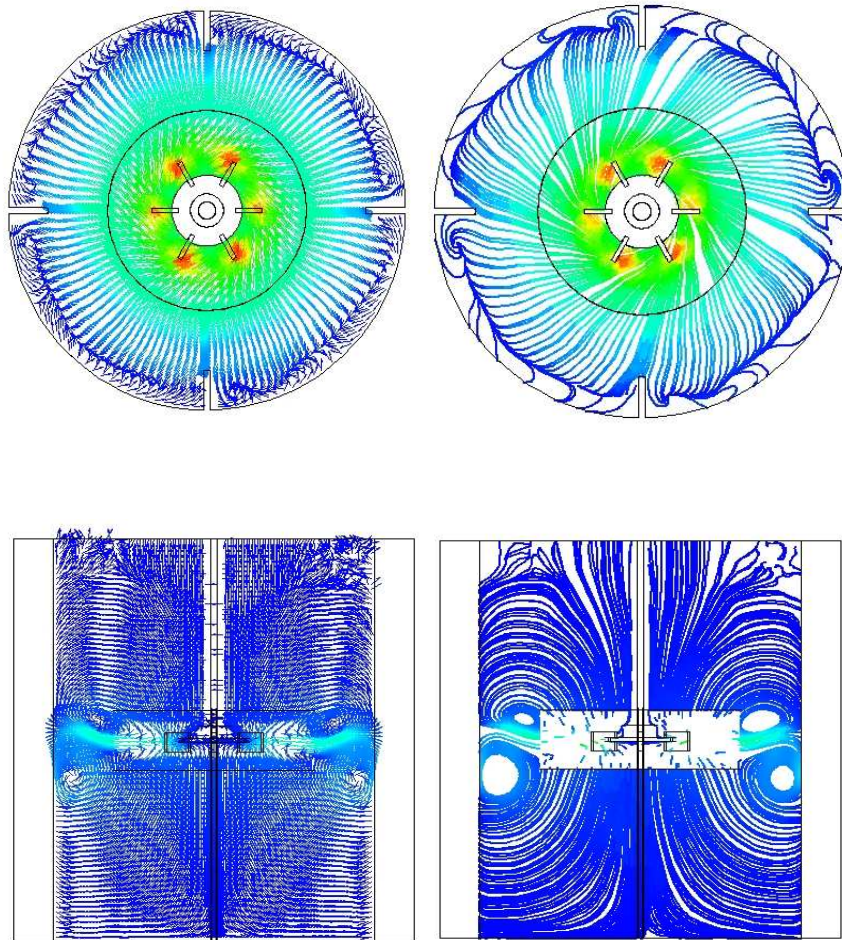
Fig. 3-2 Velocity and Streamline Plot of Type 2



(a) Velocity

(b) Streamline

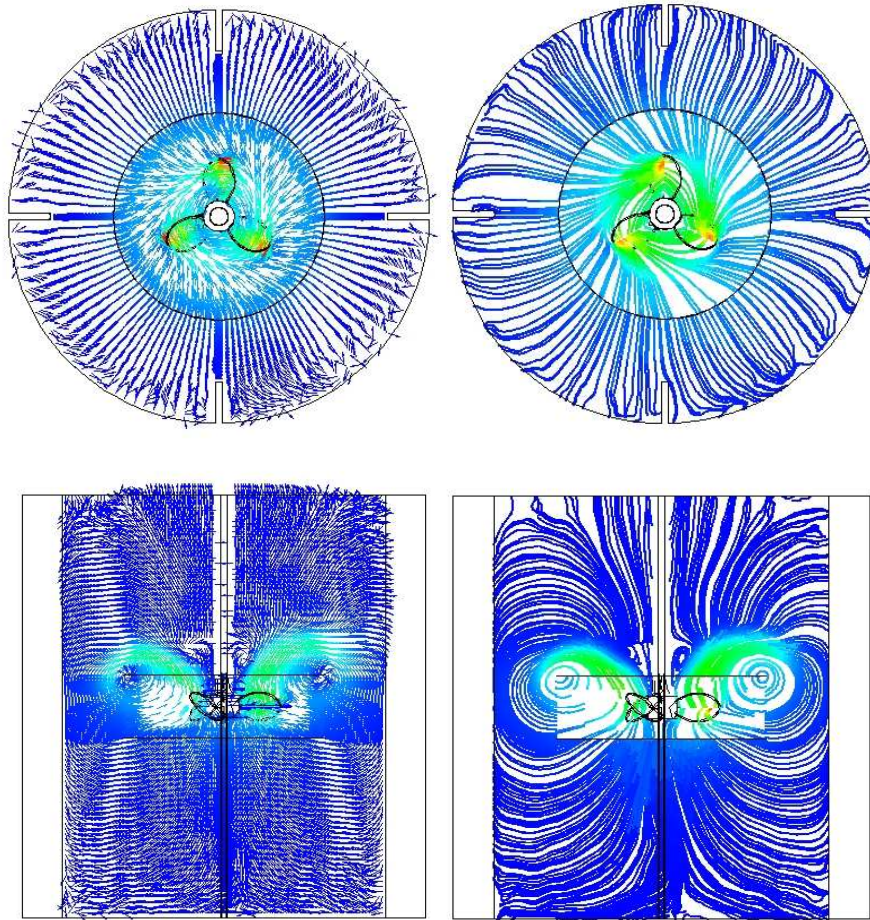
Fig. 3-3 Velocity and Streamline Plot of Type 3



(a) Velocity

(b) Streamline

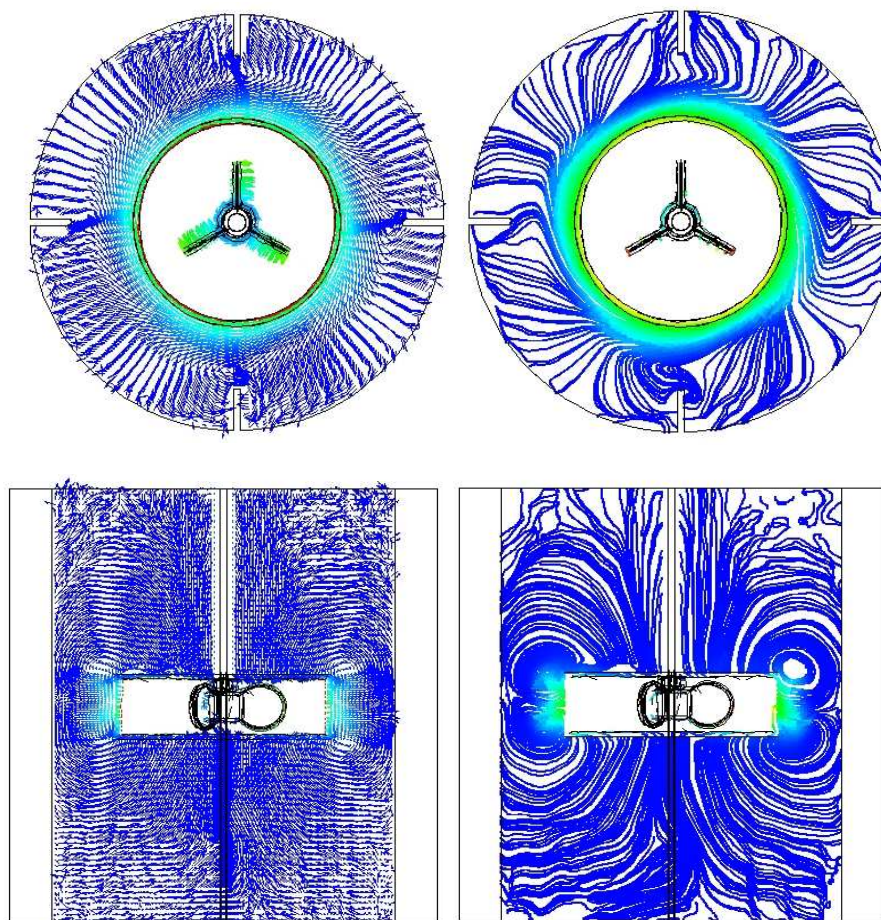
Fig. 3-4 Velocity and Streamline Plot of Type 4



(a) Velocity

(b) Streamline

Fig. 3-5 Velocity and Streamline Plot of Type 5



(a) Velocity

(b) Streamline

Fig. 3-6 Velocity and Streamline Plot of Type 6

3.2 입자영상유속계(PIV) 실험

Fig. 3-7 ~ 3-9은 실험결과와 수치해석결과의 비교한 것이다.

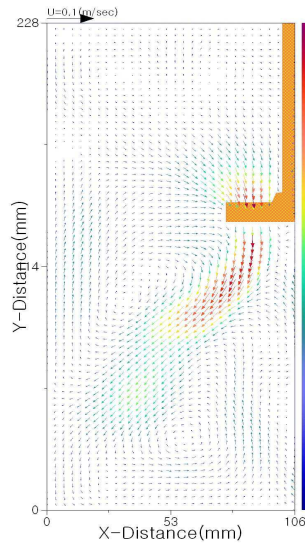
Fig. 3-7은 Pitched blade turbine 타입 임펠러, Fig. 3-8은 Propeller 타입 임펠러 그리고 Fig. 3-9는 Rushton turbine 타입 임펠러에 대한 결과이다. 그림에서 (i)는 속도벡터, (ii)는 유선, (iii)은 운동에너지이고, (iv)와도분포를 나타낸 것이다.

세 가지 결과에서 알 수 있듯이 실험결과와 수치해석결과는 비교적 잘 일치한다.

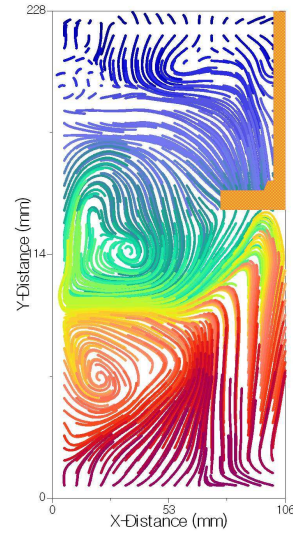
Fig. 3-9의 결과에서 알 수 있듯이 유동이 Impeller의 위치를 기준으로 상·하 대칭적인 유동패턴이 나타나며, 이는 반경방향으로 향하는 주유동의 영향 때문이다. 이로 인하여 교반기 전체 유동장은 Impeller를 중심으로 두 영역으로 분리되어 물질전달에 의한 대류현상이 발생하며, 이로 인해 교반기 유동영역에 걸쳐 고른 교반효과를 기대할 수 있는 형태의 Impeller이라고 예상된다.

이와는 달리 Fig. 3-7 ~ 3-8은 45°각도를 가진 Pitch 형태의 Impeller로써 회전방향이 시계방향이므로 유동형태가 교반기의 바닥 방향으로 향하고 있다. 이로 인해 교반기 전체 유동장에서는 비대칭적인 유동형태가 나타나고, Impeller를 기준으로 위쪽영역에 비해서 아래쪽 영역에서 활발한 교반효과를 기대할 수 있다. 이는 결과적으로 교반기 전체 유동영역에서는 고른 교반효과를 가지기 힘들다.

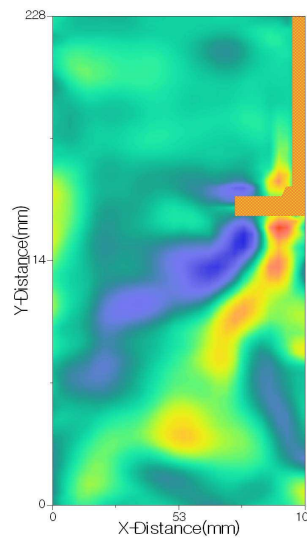
유동장의 속도, 유선, 운동에너지 그리고 와도 분포를 통해서 예측한 상기의 결과는 농도분포선도를 통해서도 확인할 수 있다.



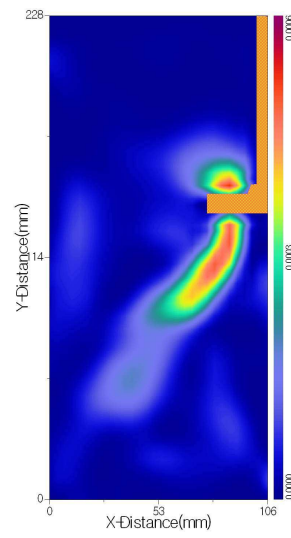
(i)



(ii)

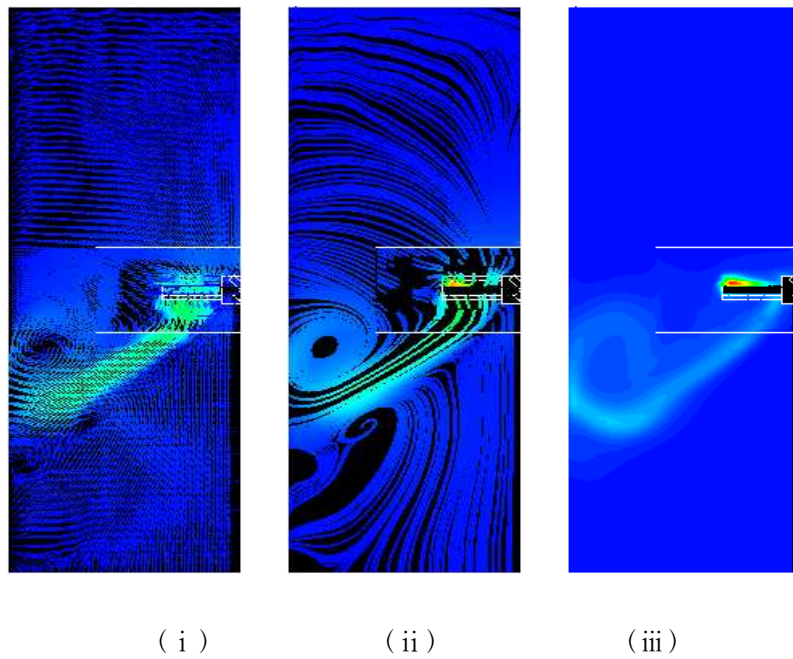


(iii)



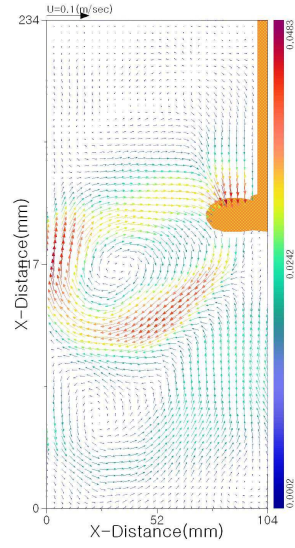
(iv)

(a) *Experimental Result*

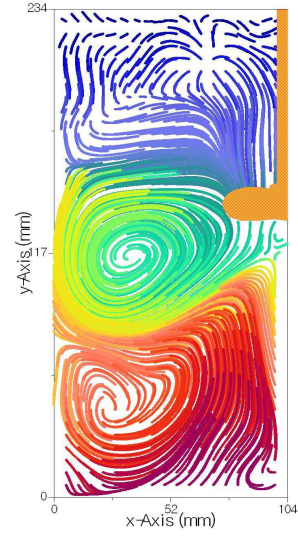


(b) Numerical Result

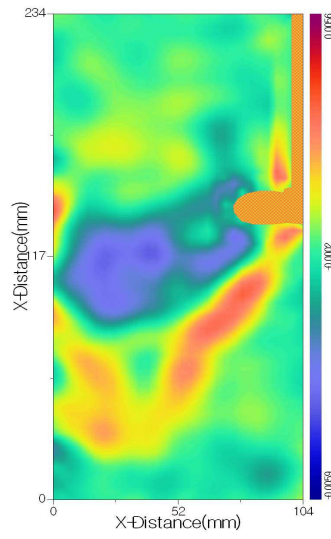
Fig. 3-7 Pitched Blade Turbine Type Impeller (100rpm)



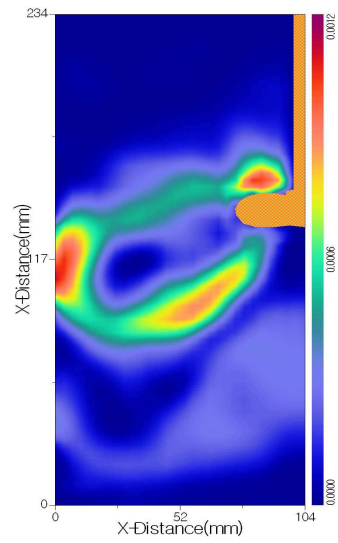
(i)



(ii)

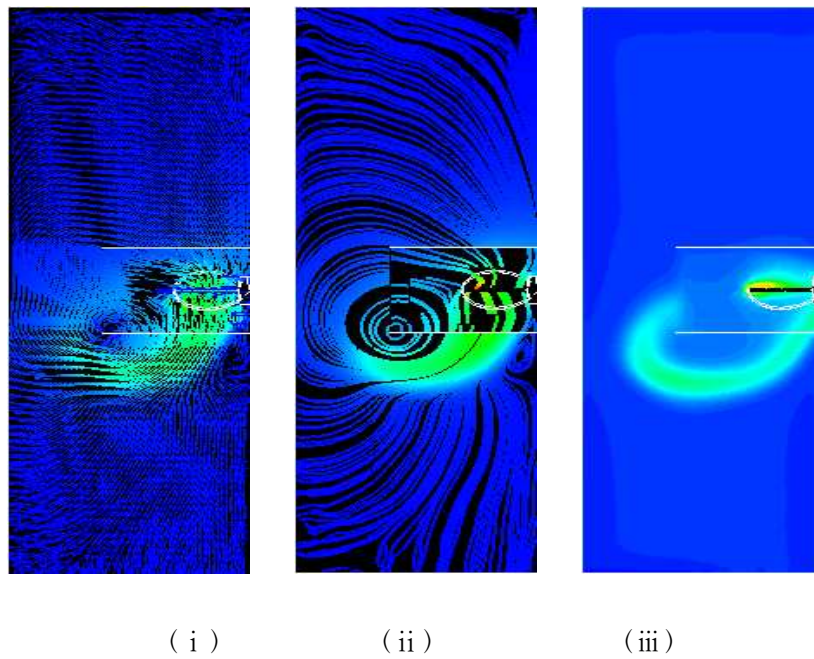


(iii)



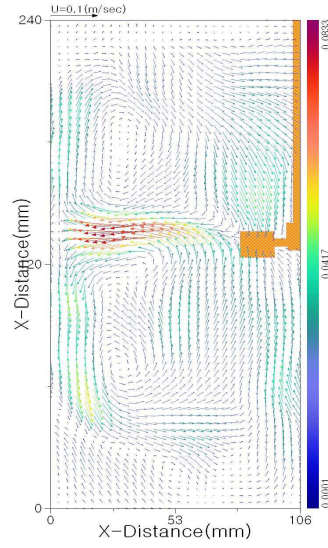
(iv)

(a) *Experimental Result*

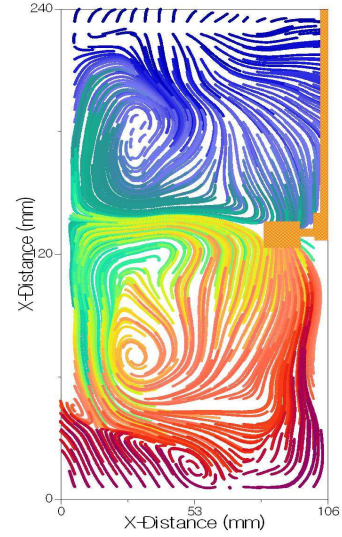


(b) Numerical Result

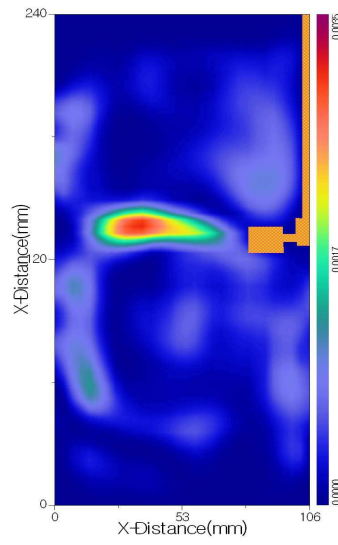
Fig. 3-8 Propeller Type Impeller (100rpm)



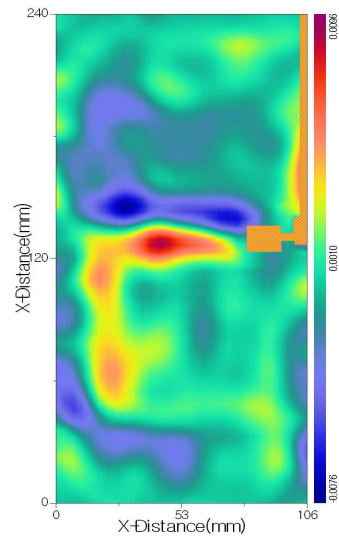
(i)



(ii)

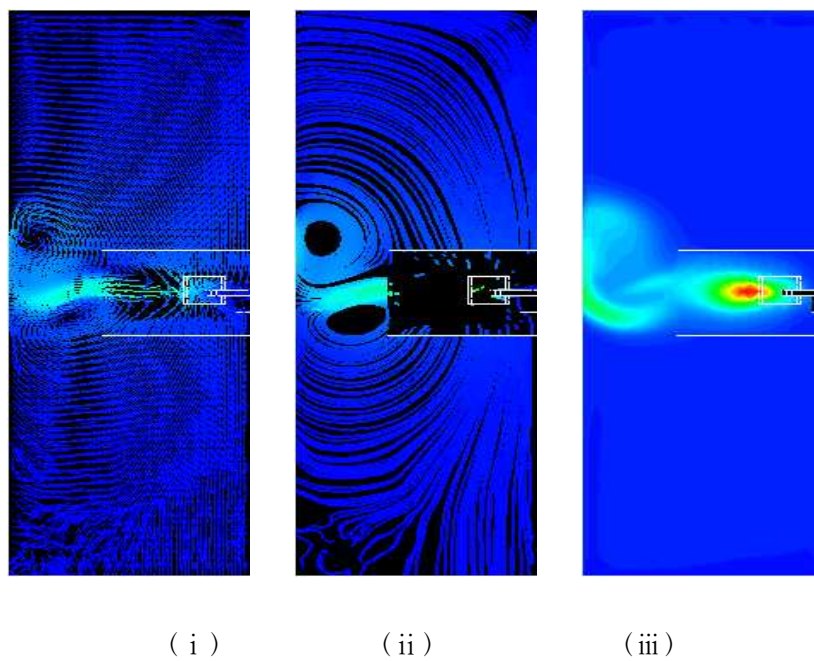


(iii)



(iv)

(a) *Experimental Result*



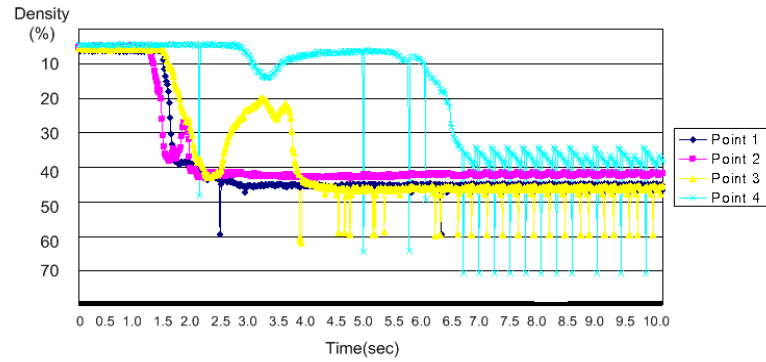
(b) Numerical Result

Fig. 3-9 Rushton Turbine Type Impeller (100 rpm)

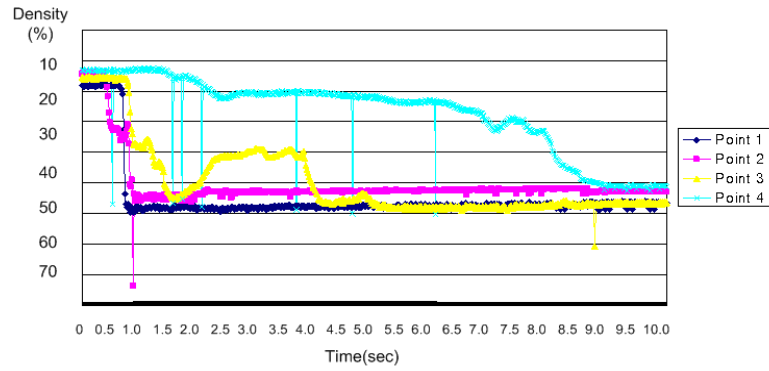
3.3 농도분포 계측실험

Fig. 3-10은 시간변화에 따른 농도계측의 결과를 도식화한 것으로써, (a)는 Pitched blade turbine 타입 임펠러, (b)는 Propeller 타입 임펠러 그리고 (c)는 Rushton turbine 타입 임펠러에 대한 결과이다. 여기서 알 수 있듯이 본 연구에서 고려한 3가지 종류의 Impeller에서 Point 1과 Point 2의 농도분포가 다른 계측 Point에 비해서 빠른 시간에 안정되는 경향을 보이고 있다. 이는 Point 3과 Point 4의 계측 지점은 불순물의 혼입에 따른 영향으로 불안정한 농도변화를 보이기 때문이다. 또한 그림에서 알 수 있듯이, Rushton turbine 타입의 임펠러가 다른 임펠러에 비해서 상대적으로 교반에 소요되는 시간이 작음을 알 수 있다. 이는 Rushton turbine 타입의 유동특성이 Impeller를 중심으로 상·하 방향으로 고른 유동장을 생성하기 때문이라고 판단된다.

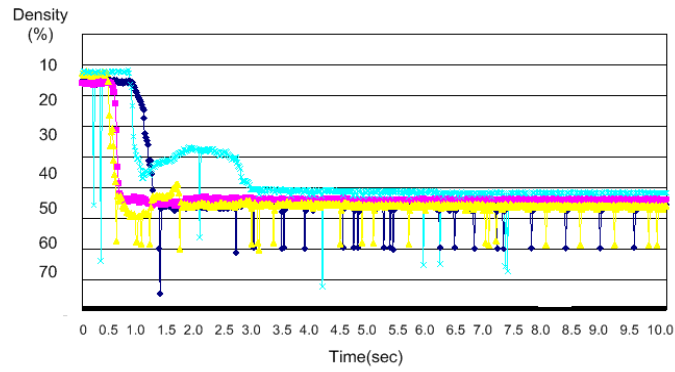
그리고 Fig. 3-11의 그림은 Rushton turbine 타입의 임펠러를 대상으로 교반조 내의 임의의 위치, 즉 (a)는 교반조의 수면에서 10mm하부, (b)는 중간, (c)는 바닥에서 상부 10mm에 각각 위치한 형상을 나타내며, 각 위치별 시간변화에 따른 농도계측의 결과를 도식화한 것이다. 여기서도 (b)에 위치한 임펠러의 경우 모든 Point에 대해 농도분포가 골고루 안정되는 경향을 보이고 있고 (a)에 위치한 임펠러의 경우 Point 1과 Point 2의 농도분포가 안정되는 시간이 많이 걸리는 경향을 알 수 있었고, (c)의 경우는 Point 2와 Point 3과 Point 4의 농도분포가 안정되는 시간이 많이 걸리는 것을 알 수 있었다.



(a) *Pitched Blade Type Impeller*

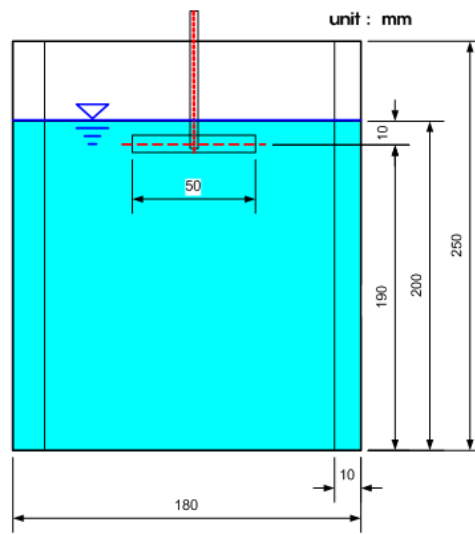


(b) *Propeller Type Impeller*

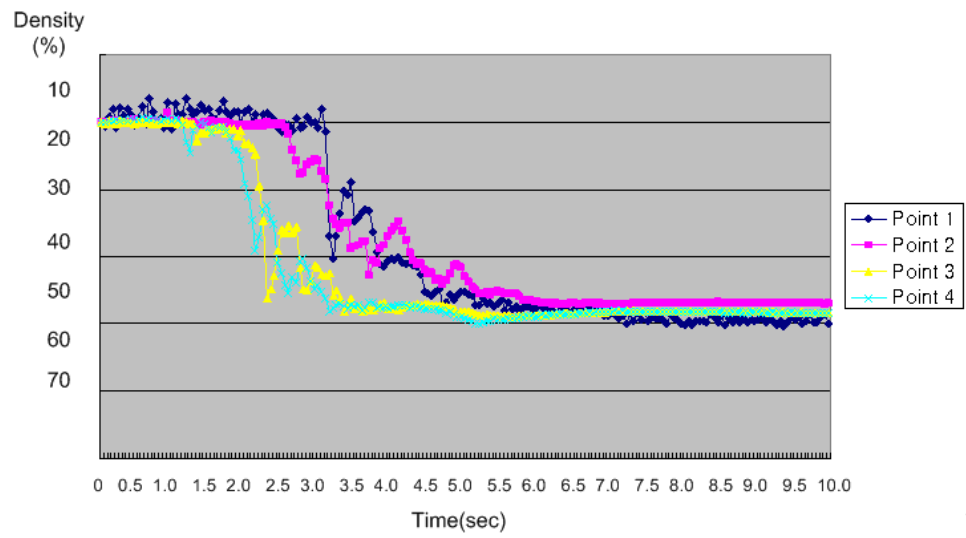


(c) *Rushton Turbine Type Impeller*

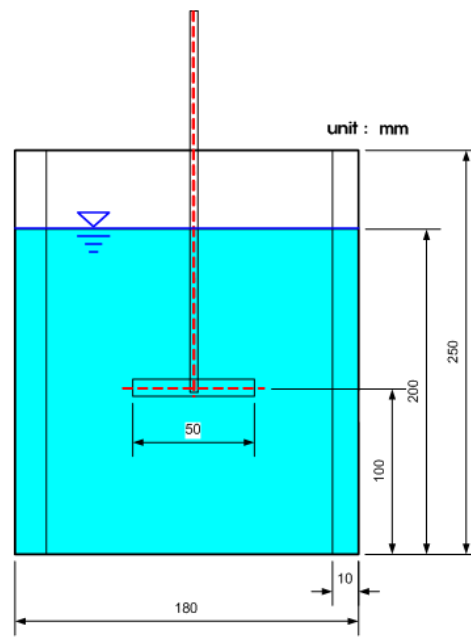
Fig. 3-10 Density Distribution by Time Lapse (100 rpm)



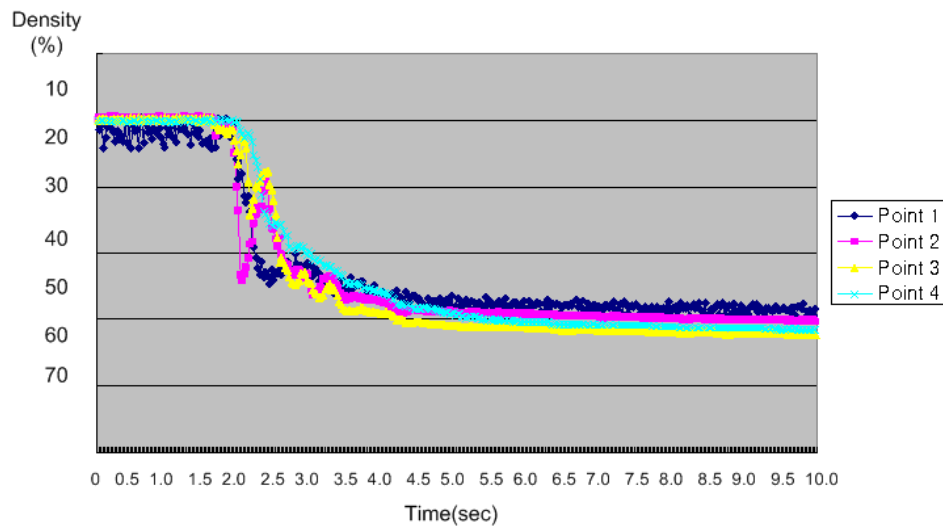
Upper part



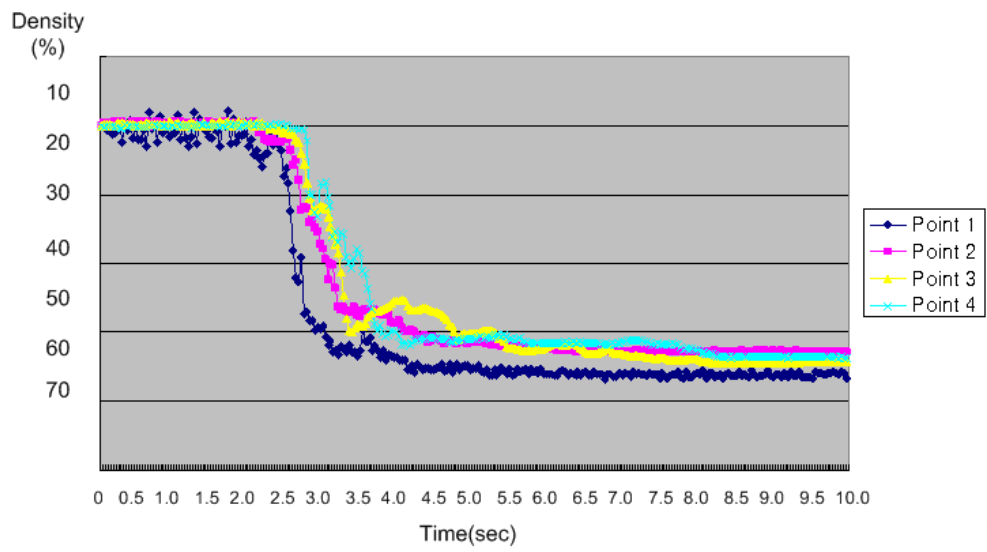
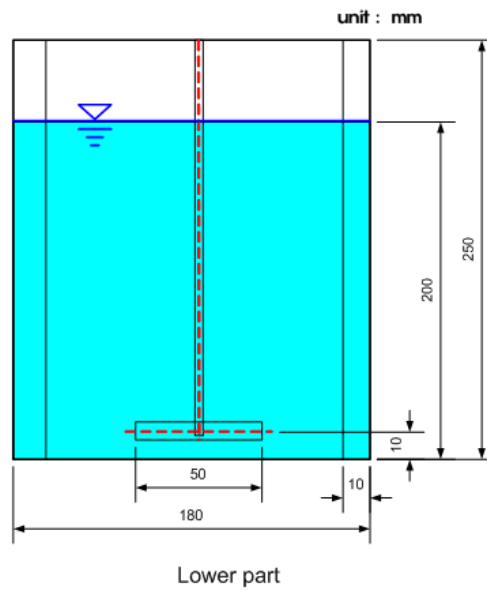
(a) 10mm below The Water Surface



Middle prat



(b) Center of The Water



(c) 10mm above of Bottom

Fig. 3-11 Density Distribution by Time Lapse (200 rpm)

4장 결 론

산업용 교반기의 임펠러형상에 따른 교반특성에 대해서 전산유체 역학과 PIV 그리고 농도계측실험을 통해서 살펴보았다. 본 연구에서 적용한 임펠러는 3가지 종류로써 임펠러형상에 따른 교반기 내부의 유동특성을 고찰하기 위해서 다른 제반사항(임펠러의 속도, 위치)은 동일하게 설정하였으며, 또한 임펠러의 위치에 따른 농도계측실험을 수행 시에는 임펠러의 형상 및 속도를 동일하게 설정하였으며, 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 교반기의 성능예측 및 교반기 내부의 농도분포를 실시간으로 동시다점적 계측을 할 수 있는 농도계측기법을 개발하였다.

(2) 본 연구에서 고려한 모든 종류의 Impeller에서 Pitch 각이 45° 인 경우보다 90° 일 때, 교반기 내부유동의 패턴이 교반기 내부의 상·하에서 고른 유동분포가 나타났다.

(3) Rushton turbine 타입 임펠러의 경우에서 vortex의 크기가 가장 크고, Propeller 타입 임펠러, Pitched blade 타입 임펠러 순이다.

(4) 미세분말입자의 교반을 목적으로 하는 경우에서 교반효율이 우수한 임펠러형상과 위치는 본 연구의 범위에서는 Rushton turbine 타입이면서 교반조의 중간에 위치한 임펠러였다.

참고문헌

1. D. Chapple, S. Kresta, "The Effect of Geometry on the Stability on the Stability of Flow Patterns in Stirred Tanks", Mixing XIV, Santa Barbara, CA, June 20-25, 1993.
2. S. Winardi, Y. Nagase, "Unstable Phenomenon of Flow in a Mixing Vessel with a Marine Propeller", Journal of Chemical of Japan, Vol. 24, No. 2, pp.243-249, 1991.
3. A. Bakker, V. D. Akker, H. E. A., "Single-Phase Flow in stirred Reactors", Trans. IChemE, Vol. 72, Part A, pp.583-593, 1994.
4. S. Haam, R. S. Brodkey, J. B. Fasano, "Local Heat Transfer in a Mixing Vessel Using Heat Flux Sensors", Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 31, No. 5, pp.1384-1391, 1993.
5. A. Bakker, V. D. Akker, H. E. A., "Gas-Liquid Contacting with Axial flow Impeller", Trans. IChemE, Vol. 72, Part A, pp.573-582, 1994.
6. H. Tsurusaki, and T. Urata. "A Measuring Method for 3-D Study Flow by Digital Image Processing of Pathline Pictures", The Winter Annual Meeting of the ASME on Flow Visualization, San Francisco, CA, Dec. 10-15, pp.95-100, 1989.
7. T. Kobayashi, T. Saga, Y. H. Lee, "Flow Visualization and Analysis of 3-D Square Cavity and Mechanical Agitated Vessels by PIV", Proc. of the International Workshop on PIV-Fukui'95,

Fukui, Japan, July 2-5, pp.401-406, 1995.

8. K. J. Myers, R. W. Ward, A. Bakker, "A Digital Particle Image Velocimetry Investigation of Flow Field Instabilities of Axial Flow Impellers", ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 119, No. 1, pp.623-632, 1997.

9. A. Kemoun, F. Lusseyran, J. Mallet, M. Mahouast, "Experimental scanning for simplifying the model of a stirred-take flow, Experiments in Fluids", Experiments in Fluids, Vol. 25, No.1, pp.23-36, 1998.

10. J.W.Choi, D.H.Doh, Y.H.Lee, "A PIV Application to the Evaporator-Room Flow in Refrigerator", Proc. of 4th Asian Symposium on Visualization ASV'96, pp.299-304, 1996.

11. 최장운, 조대환, 이영호, PIV에 있어서의 입자추적기법의 개선, 대한기계학회 추계학술대회 논문집 제2권, pp.360-365, 1993.

12. 최장운, 이영호, "PIV에서의 보간방법의 적용", 대한기계학회 추계학술대회, 논문집 제 2권, pp.49-56, 1995.

13. 이현, 김미영, 최장운, 이영호, PIV에 의한 뭉툭 물체 후류에서의 유동특성에 관한 연구, 한국유체공학학술대회 논문집, pp.403-406, 2000.

감사의 글

학위과정 동안 학문적인 지도뿐만 아니라 10년이 넘는 세월 속에서도 한결 같이 인생의 머릿돌로 자리매김 하여 주신 이영호 지도교수님께 마음 다하여 감사를 드립니다. 그리고 바쁘신 중에도 학위논문을 심사하셔서 부족한 논문을 세심하게 다듬어주신 김유택교수님, 유삼상교수님께 고개 숙여 감사를 드리며, 평소에 지도편달과 학문적 가르침을 아끼지 않으신 기계공학부 은사님들과 목포해양대학교의 최민선교수님, 이경우교수님 그리고 동명대학교의 배석태교수님께 감사를 드립니다. 또한 실험과 논문정리에 세심한 배려를 아끼지 않으신 동명대학교의 김동균교수님 그리고 조선기자재 연구원의 김정환박사, 박재현연구원에게도 큰 감사를 드립니다.

한편, 처음 연구실로 인도하여 학위 논문이 완성되기까지 모든 정성을 아끼지 않으신 목포해양대학교의 조대환교수님의 은혜는 잊을 수 없으며, 연구실에서 밤낮없이 고락을 함께했던 김만웅선배님, 김상완선배님, 심의보선배님, 서광욱선배님, 김동찬선배님, 최장운선배님, 김영도박사, 남창조박사와 진영이, 종웅이, 범석이, 구만이에게 감사를 전하여, 모두의 앞날에 영광이 함께 하길 바랍니다.

또한, 실험 장치를 제작하면서 친동생처럼 아껴주신 신행철사장님과 항상 자신의 자리에서 열심히 일하며 힘이 되어준 김영식사장님과 문병운, 임수봉, 고영신, 전승일 군에게도 감사의 마음을 전하며, 일생을 같이 하며 묵묵히 자리를 같이한 잊을 수 없는 어릴 적 친구들인 김종대, 김춘화, 우경태, 정승일에게 감사하며 늘 사랑과 행복이 가득하길 기도드립니다. 그리고 인생에 잊을 수 없는 공부방 식구들, 믿음과 빛 식구들에게도 감사의 마음을 전합니다.

끝으로 오늘이 있기까지 보이지 않는 도움과 따뜻한 격려를 주셨던 장모님께 감사를 드리며 건강하게 오래 사시기를 기도드리며, 사랑하는 동근, 용근, 유완이와 항상 모든 일을 자신의 일처럼 최선을 다하는 사랑하는 동생 종수에게 깊은 감사를 전합니다. 아울러 지난 7년 동안 술한 어려움과 고뇌를 항상 행복으로 여기며 남편과 항상 같이 하여준 영원한 반쪽인 사랑하는 아내 곽유영과 행복과 기쁨의 상징인 사랑하는 딸 별과 새로 태어난 아들 바다와 이 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.

이십여 년을 홀로 두 아들 걱정과 삶의 고통을 건강과 바꾸고도 행복이라 여기며 감사하는 어머니의 거칠어진 손마디를 느끼며 모든 중요한 결정하나하나가 이 큰아들의 어깨를 누를 때 마다 항상 원망만 했던 아버님의 영전에 이 논문을 바칩니다.

丁亥年 1月 韓鐘奭 拜上